

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL
MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

MODELADO DE UN AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO MEDIANTE ECOSIMPRO

Autor: **D. Rubén Rodríguez Cadenas**

Tutoras: **Dra. D^a Ester Olmeda Santamaría**

Dra. D^a M^a Jesús López Boada

Junio 2012

Este proyecto de fin de carrera simboliza el final de un largo y duro pero gratificante periodo que no hubiera sido posible sin las personas que se citan a continuación.

A M^a Jesús y Ester, por su dedicación a lo largo de toda la elaboración del presente proyecto.

A mi familia, y en especial a mis padres por brindarme la oportunidad de estudiar e inculcarme los valores de trabajo y esfuerzo, los cuales he intentado imitar. No me olvido de mi hermana que de una manera u otra me ha ayudado a crecer como persona.

A Blanca, por estar ahí fuera el momento que fuese y creer en mí hiciera lo que hiciese.

A mis amigos, por su ayuda en forma de consejos y ánimos para salir adelante en los momentos difíciles.

A mis compañeros, por las largas horas de clase y estudio juntos. Éstas han sido menos duras gracias a ellos.

Y, en general, mi más sincero agradecimiento a todas las personas que de manera voluntaria o involuntaria se han cruzado en mi carrera académica y han colaborado en que esta etapa fuese lo más fructífera posible.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	2
1.3. ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO.....	3
CAPÍTULO 2. EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN.....	5
2.1. INTRODUCCIÓN.....	6
-Fenómeno de resonancia.....	8
-Amortiguamiento crítico.....	9
2.2. ELEMENTOS DE LA SUSPENSIÓN.....	10
2.2.1. REQUISITOS.....	10
2.2.2. ELEMENTOS ELÁSTICOS.....	11
2.2.2.1. Ballestas.....	11
2.2.2.2. Muelles helicoidales.....	12
2.2.2.3. Barras de torsión.....	13
2.2.3. ELEMENTOS DE AMORTIGUACIÓN.....	14
2.2.3.1. De fricción.....	14
2.2.3.2. Hidráulicos.....	15
a) Amortiguador bitubo.....	15
b) Amortiguador monotubo.....	16
c) Amortiguadores con electroválvulas.....	18
2.2.4. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS.....	20
2.2.4.1. Casquillos o silentblocks.....	20
2.2.4.2. Trapecios o brazos de la suspensión.....	20
2.2.4.3. Tirantes.....	21
2.2.5. ELEMENTOS DE MEJORA.....	21
2.2.5.1. Barras estabilizadoras.....	21
2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE SUSPENSIÓN.....	21
2.3.1. SEGÚN LA GEOMETRÍA.....	22
2.3.1.1. Suspensión rígida.....	22
2.3.1.2. Suspensión semirrígida.....	23
a) Eje de Dion.....	23
b) Eje torsional.....	24
2.3.1.3. Suspensión independiente.....	24
a) Eje oscilante.....	25

b) Brazos tirados o arrastrados.....	26
c) McPherson.....	27
d) Paralelo deformable.....	28
e) Multibrazo o <i>multilink</i>	28
2.3.1.4. Otros tipos de suspensión	29
a) Suspensión hidroneumática.....	29
b) Suspensión neumática.....	29
2.3.2. SEGÚN EL SISTEMA DE CONTROL.....	30
2.3.2.1. Suspensión pasiva.....	30
2.3.2.2. Suspensión activa.....	31
2.3.2.3. Suspensión semiactiva.....	32
CAPÍTULO 3. FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS	35
3.1. INTRODUCCIÓN A LA REOLOGÍA	36
3.1.1. PROPIEDADES REOLÓGICAS.....	37
3.1.2. APLICACIÓN DEL ESTUDIO DE LA REOLOGÍA.....	38
3.2. MATERIALES INTELIGENTES	39
3.2.1. MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA.....	39
3.2.2. MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS Y ELECTROELECTRIVOS.....	40
3.2.3. MATERIALES CROMOACTIVOS Y FOTOACTIVOS.....	41
3.2.4. MATERIALES ELECTRO-REOLÓGICOS Y MAGNETO-REOLÓGICOS.....	41
3.3. APLICACIONES EN COMÚN DE LA REOLOGÍA	43
3.3.1. CONTROL DE VIBRACIONES SÍSMICAS EN ESTRUCTURAS.....	43
3.3.2. SUSPENSIÓN DE ASIENTOS DE VEHÍCULOS INDUSTRIALES.....	44
3.3.3. AMORTIGUADORES DE VIBRACIONES INDUSTRIALES.....	44
3.3.4. FRENOS MAGNETO-REOLÓGICOS ROTATIVOS.....	45
3.4. EL AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO	45
CAPÍTULO 4. INTRODUCCIÓN AL MODELADO CON ECOSIMPRO	48
4.1. INTRODUCCIÓN AL MODELADO ORIENTADO A OBJETOS	49
4.2. CARACTERÍSTICAS MOO	49
4.2.1. Encapsulamiento.....	49
4.2.2. Herencia.....	49
4.2.3. Agregación.....	50
4.3. TIPOS DE MODELO	50
4.3.1. Modelos de tiempo continuo.....	51

4.3.2. Modelos de tiempo discreto.....	51
4.3.3. Modelos cualitativos.....	52
4.3.4. Modelos de sucesos o eventos discretos.....	52
4.4. MODELO CAUSAL O ACAUSAL.....	53
4.5. ECOSIMPRO COMO HERRAMIENTA MOO.....	54
4.5.1. INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA.....	54
4.5.2. CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA.....	57
4.5.3. LENGUAJE DE MODELADO.....	58
4.5.4. TIPOS DE DATOS BÁSICOS.....	58
4.5.5. LIBRERÍAS.....	59
4.5.6. DECLARACIONES.....	60
4.5.7. PUERTOS.....	60
a) Ecuaciones de conexión con los puertos.....	61
b) Restricciones de conexión con los puertos.....	61
4.5.8. COMPONENTES.....	62
a) Componentes abstractos.....	62
b) Categoría de las variables.....	62
c) Bloque discreto.....	62
d) Bloque continuo.....	62
4.5.9. FUNCIONES.....	63
a) Funciones con forma de onda.....	63
4.5.10. PARTICIONES.....	65
4.5.11. EXPERIMENTOS.....	65
a) Funciones en los experimentos.....	65
4.5.12. COMPARACIÓN ENTRE MODELICA Y ECOSIMPRO.....	66
a) Tipos y propiedades de los datos.....	66
b) Clases de componentes.....	67
c) Librerías.....	67
d) Otras diferencias.....	68
e) Conclusiones.....	68
CAPÍTULO 5. MODELADO DE AMORTIGUADORES MAGNETO-REOLÓGICOS.....	69
5.1. INTRODUCCIÓN Y CONSIDERACIONES PREVIAS.....	70
5.2. MODELOS DE AMORTIGUADORES MAGNETO-REOLÓGICOS.....	70
5.2.1. EL MODELO DE BOUC-WEN.....	72

5.2.2. EL MODELO DE ALG.....	75
5.3. LIBRERÍA DE COMPONENTES.....	77
5.3.1. COMPONENTE PARED (wall.el).....	77
5.3.2. COMPONENTE EXCITADOR SINUSOIDAL (displacement_source.el).....	78
5.3.3. COMPONENTE FUENTE DE INTENSIDAD (current_source.el).....	79
5.3.4. COMPONENTE FUENTE DE VOLTAJE (voltage_source.el).....	80
5.3.5. COMPONENTE AMORTIGUADOR BOUC-WEN (damper_bw.el).....	81
5.3.6. COMPONENTE AMORTIGUADOR ALG (damper_alg.el).....	82
5.4. LIBRERÍA DE PUERTOS.....	83
5.4.1. PUERTO ELÉCTRICO (elec_port.el).....	83
5.4.2. PUERTO MECÁNICO (mech_port.el).....	84
CAPÍTULO 6. RESULTADOS DE SIMULACIÓN.....	86
6.1. LA SIMULACIÓN CON ECOSIMPRO.....	87
6.2. RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE BOUC-WEN.....	89
6.3. RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE ALG.....	95
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.....	101
7.1. CONCLUSIONES.....	102
7.2. DESARROLLOS FUTUROS.....	103
REFERENCIAS.....	104

Figura 2.1	Esquema del sistema de amortiguación en un Opel Astra.....	6
Figura 2.2	Movimientos de la carrocería en un vehículo.....	7
Figura 2.3	Fenómeno de resonancia en una gráfica desplazamiento-frecuencias.....	8
Figura 2.4	Curva del amortiguamiento crítico.....	10
Figura 2.5	Elementos de una ballesta.....	11
Figura 2.6	Montaje longitudinal y transversal de una ballesta.....	12
Figura 2.7	Características de un resorte helicoidal.....	13
Figura 2.8	Amortiguador normal, de paso variable y cónico.....	13
Figura 2.9	Descripción del movimiento de una barra de torsión.....	13
Figura 2.10	Montaje longitudinal y transversal de una barra de torsión.....	14
Figura 2.11	Amortiguador de fricción.....	14
Figura 2.12	Esquema de un amortiguador bitubo (A no presurizado, B presurizado).....	15
Figura 2.13	Esquema de un amortiguador monotubo.....	17
Figura 2.14	Esquema completo de un amortiguador monotubo.....	17
Figura 2.15	Esquema de un amortiguador con electroválvulas.....	19
Figura 2.16	Detalle del casquillo de una suspensión.....	20
Figura 2.17	Situación de los trapecios en el sistema de suspensión.....	21
Figura 2.18	Esquema simplificado de la suspensión rígida.....	22
Figura 2.19	Composición de una suspensión rígida trasera.....	23
Figura 2.20	Esquema de una suspensión semirrígida con eje de Dion.....	24
Figura 2.21	Esquema de una suspensión semirrígida de eje torsional.....	24
Figura 2.22	Esquema de una suspensión de eje oscilante.....	25
Figura 2.23	Esquema de suspensión de brazos arrastrados.....	26
Figura 2.24	Suspensión de brazos semiarrastrados.....	26
Figura 2.25	Esquema simplificado de la suspensión McPherson.....	27
Figura 2.26	Esquema de una suspensión de paralelo deformable.....	28
Figura 2.27	Esquema de una suspensión multibrazo delantero de un Audi A6.....	28
Figura 2.28	Esquema del funcionamiento de la suspensión hidroneumáticas.....	29
Figura 2.29	Componentes de una suspensión neumática de un Audi A8.....	30
Figura 2.30	Esquema de una suspensión pasiva.....	30
Figura 2.31	Esquema simplificado de una suspensión activa.....	31
Figura 2.32	Detalle del sistema de suspensión Active Body Control de Mercedes-Benz	32
Figura 2.33	Sistema de suspensión Airmatic Dual Control del Mercedes clase E.....	33

Figura 2.34	Sistema de suspensión Electronic Damping Control de BMW.....	33
Figura 2.35	Viste en corte longitudinal de un amortiguador magneto-reológico.....	34
Figura 3.1	Esfuerzo de corte en función de la densidad de flujo.....	37
Figura 3.2	Viscosidad como función de la velocidad de corte.....	38
Figura 3.3	Proceso de estados de un material inteligente de forma.....	40
Figura 3.4	Campo de velocidades en un fluido magnético.....	42
Figura 3.5	Relación del esfuerzo viscoso y la velocidad de deformación.....	42
Figura 3.6	Amortiguador magneto-reológico para asientos de vehículos industriales..	44
Figura 3.7	Amortiguador magneto-reológico para estructuras civiles.....	44
Figura 3.8	Amortiguador para vibraciones industriales.....	45
Figura 3.9	Esquema de un freno magneto-reológico.....	45
Figura 3.10	Estructura de un amortiguador Magnetic-Ride de Delphi.....	46
Figura 3.11	Sistema de suspensión Magnetic Ride en el Audi R8.....	47
Figura 3.12	Esquema electrónico del sistema de suspensión del Audi R8.....	47
Figura 4.1	Ejemplo de modelo de tiempo continuo.....	51
Figura 4.2	Ejemplo de modelo de tiempo discreto.....	52
Figura 4.3	Ejemplo de modelo cualitativo.....	52
Figura 4.4	Ejemplo de modelo de sucesos o eventos discretos.....	53
Figura 4.5	Ejemplo de sistema acausal.....	54
Figura 4.6	Ejemplo de experimento en EcosimPro.....	57
Figura 4.7	Menú de librerías en EcosimPro.....	59
Figura 4.8	Representación de una onda cuadrada.....	63
Figura 4.9	Representación de una onda de paso.....	64
Figura 4.10	Representación de una onda de pulso.....	64
Figura 4.11	Representación de una onda de rampa.....	64
Figura 5.1	Los tres modelos de amortiguador magneto-reológico más importantes..	71
Figura 5.2	Esquema representativo del modelo de Bouc-Wen.....	72
Figura 5.3	Esquema del modelo de Bouc-Wen modificado en EcosimPro.....	74
Figura 5.4	Gráficas de resultados del modelo de Bouc-Wen modificado.....	74
Figura 5.5	Amortiguador magneto-reológico RD 1005 (Lord Ltd.) usado en el estudio	75
Figura 5.6	Esquema del modelo de Alg en EcosimPro.....	76
Figura 5.7	Representación de la fuerza amortiguador frente a la velocidad para varios valores de voltaje de entrada.....	76
Figura 5.8	Librería DAMPER_MR y los componentes de dicha librería.....	77
Figura 5.9	Código del componente pared (wall.el).....	78

Figura 5.10	Aspecto del componente pared (wall.el).....	78
Figura 5.11	Código del componente excitador sinusoidal (displacement_source.el)....	79
Figura 5.12	Apariencia del componente excitador sinusoidal (displacement_source.el)	79
Figura 5.13	Código del componente fuente de intensidad (current_source.el).....	80
Figura 5.14	Imagen del componente fuente de intensidad (current_source.el).....	80
Figura 5.15	Código del componente fuente de voltaje (voltage_source.el).....	80
Figura 5.16	Componente fuente de voltaje (voltage_source.el) en EcosimPro.....	81
Figura 5.17	Código del componente amortiguador MR de Bouc-Wen (damper_bw.el)	82
Figura 5.18	Aspecto del componente amortiguador de Bouc-Wen (damper_bw.el)....	82
Figura 5.19	Código del componente amortiguador MR de Alg (damper_alg.el).....	83
Figura 5.20	Apariencia del componente amortiguador de Alg (damper_alg.el).....	83
Figura 5.21	Código del puerto eléctrico (elec_port.el).....	84
Figura 5.22	Aspecto de un puerto de tipo eléctrico en la paleta de EcosimPro.....	84
Figura 5.23	Código del puerto mecánico (mech_port.el).....	84
Figura 5.24	Aspecto de un puerto de tipo mecánico en la paleta de EcosimPro.....	85
Figura 6.1	Creación de una partición en EcosimPro.....	87
Figura 6.2	Validación de una partición en EcosimPro.....	87
Figura 6.3	Creación de un experimento en EcosimPro.....	88
Figura 6.4	Código de un experimento por defecto en EcosimPro.....	88
Figura 6.5	Opciones de compilación y simulación en monitor de Ecosimpro.....	88
Figura 6.6	Menú de opciones del EcosimPro Monitor.....	89
Figura 6.7	Elección de variables en la opción <i>New plot</i>	89
Figura 6.8	Esquema del modelo de Bouc-Wen en EcosimPro.....	89
Figura 6.9	Parámetros del componente excitador sinusoidal.....	90
Figura 6.10	Propiedades del componente amortiguador de Bouc-Wen.....	90
Figura 6.11	Parámetros del componente fuente de corriente.....	91
Figura 6.12	Código del experimento del modelo de Bouc-Wen.....	92
Figura 6.13	Gráfica de la fuerza amortiguadora frente al desplazamiento del modelo de Bouc-Wen (EcosimPro).....	92
Figura 6.14	Gráfica de la fuerza amortiguadora frente a la velocidad del modelo de Bouc-Wen (EcosimPro).....	93
Figura 6.15	Esquema de programación por bloques del modelo de Bouc-Wen (Simulink).....	93
Figura 6.16	Gráfica de la fuerza amortiguadora frente al desplazamiento del modelo de Bouc-Wen (Simulink).....	94
Figura 6.17	Gráfica de la fuerza amortiguadora frente a la velocidad del modelo de Bouc-Wen (Simulink).....	94

Figura 6.18	Esquema del modelo de Alg en la paleta de EcosimPro.....	95
Figura 6.19	Parámetros del excitador sinusoidal.....	95
Figura 6.20	Parámetros del componente amortiguador de Alg.....	96
Figura 6.21	Parámetros del componente fuente de voltaje.....	97
Figura 6.22	Gráfica de la fuerza amortiguadora frente al desplazamiento en el modelo de Alg (EcosimPro).....	97
Figura 6.23	Gráfica de la fuerza amortiguadora frente a la velocidad en el modelo de Alg (EcosimPro).....	98
Figura 6.24	Esquema del modelo de Alg en programado en Simulink.....	98
Figura 6.25	Gráfica de la fuerza amortiguadora frente al desplazamiento en el modelo de Alg (Simulink).....	99
Figura 6.26	Gráfica de la fuerza amortiguadora frente a la velocidad en el modelo de Alg(Simulink).....	99

Tabla 3.1	Propiedades de un fluido magneto-reológico común.....	43
Tabla 4.1	Comparación entre las variables de Modelica y EcosimPro.....	66
Tabla 4.2	Comparación de las secciones de las clases en Modelica y Ecosimpro.....	67
Tabla 6.1	Parámetros del amortiguador de Bouc-Wen y sus unidades en el SI.....	91
Tabla 6.2	Parámetros del componente amortiguador de Alg y sus unidades en el SI....	96



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN



1.1. INTRODUCCIÓN

La industria automovilística, desde sus inicios a finales del siglo XIX, ha experimentado una evolución vertiginosa debido al uso tan extendido que se hace del automóvil desde que se concibió. Esta evolución en el sector no es más que una suma del desarrollo en cada aspecto del vehículo: el chasis para mejorar la aerodinámica, el motor, los frenos o la suspensión para aumentar las prestaciones, la introducción de la electrónica para mejorar el comportamiento y un largo etcétera.

El sistema de suspensión es uno de los elementos más importantes del vehículo. La seguridad y el confort de los pasajeros dependen de su funcionamiento. Esto ha provocado grandes inversiones en este campo, desarrollándose multitud de sistemas cada vez más eficientes.

Más en particular, las suspensiones reológicas que se están desarrollando actualmente se caracterizan por ser un campo novedoso y moderno, cuya inversión y evolución han experimentado un gran crecimiento en las últimas décadas.

El componente fundamental de cualquier suspensión reológica es el amortiguador reológico. En el presente proyecto se persigue modelar y simular con la herramienta EcosimPro dos modelos de amortiguadores reológicos, el de Bouc-Wen modificado y Alg, y cuyos fluidos son magnéticos. Es decir, se trata de dos amortiguadores magneto-reológicos.

1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto es la creación de una librería en la herramienta de modelado y simulación EcosimPro enfocada a amortiguadores magneto-reológicos.

El modelado y simulación mediante cualquier herramienta informática permite la obtención de datos y el desarrollo de componentes con un coste inferior al que habría que invertir mediante una experimentación real. Además, permite llevar el componente hasta el límite sin el riesgo de romperlo o dejarlo inutilizable.



Por tanto, se puede decir que este proyecto también pretende reducir el coste de desarrollo de amortiguadores magneto-reológicos, donde se puede conocer mejor su comportamiento variando los parámetros de las ecuaciones que gobiernan el modelo creado.

Este proyecto incluye el desarrollo dos modelos de amortiguadores con la idea de desarrollar más modelos en futuros proyectos. Los modelos elegidos, Bouc-Wen modificado y Alg, se detallan en el quinto capítulo del presente proyecto.

1.3. ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO

El presente proyecto se articula en siete capítulos. El primero de todos ellos es la presente introducción.

El segundo capítulo trata acerca de los sistemas de suspensión, sus funciones, sus características, los elementos que lo forman y una clasificación atendiendo a su geometría y a su forma de control.

En el tercer capítulo se expone la tecnología de los fluidos reológicos, cómo funcionan, porqué son especiales y útiles así como las aplicaciones de este tipo de fluidos en amortiguadores y otros elementos que se usan en la actualidad. Además, se explica el funcionamiento del amortiguador magneto-reológico.

El cuarto capítulo explica el software de modelado y simulación EcosimPro, cuya filosofía es el modelado orientado a objetos. Se exponen las características de este tipo de modelado, sus tipos de modelo, así como el lenguaje de programación que se usa, sus librerías y sus puertos. También se compara EcosimPro con Modelica, otra herramienta de modelado y simulación muy importante.

El capítulo quinto describe el modelado de los amortiguadores magneto-reológicos. Primero, explicando el funcionamiento de cada modelo y, segundo, explicando qué elementos, puertos y componentes, se han creado y cuáles se han tomado del programa.

En el capítulo sexto se exponen los resultados de las simulaciones en forma de gráficas de la fuerza amortiguadora en función del desplazamiento relativo del muelle y de su derivada, así como un análisis de los mismos basado en el comportamiento de ambos modelos.



El séptimo y último capítulo reproduce las conclusiones extraídas de todos los experimentos en ambos modelos y explica los posibles desarrollos futuros sobre la biblioteca de amortiguadores magneto-reológicos en EcosimPro.



CAPÍTULO 2

EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN

2.1. INTRODUCCIÓN

El sistema de suspensión se puede definir como el conjunto de elementos que actúan entre las partes no suspendidas de un vehículo (ejes y ruedas), y las partes suspendidas (bastidor, carrocería, bloque motor, pasajeros y carga) [1, 2, 3, 8]. En la figura 2.1 se pueden observar los componentes que forman una suspensión.

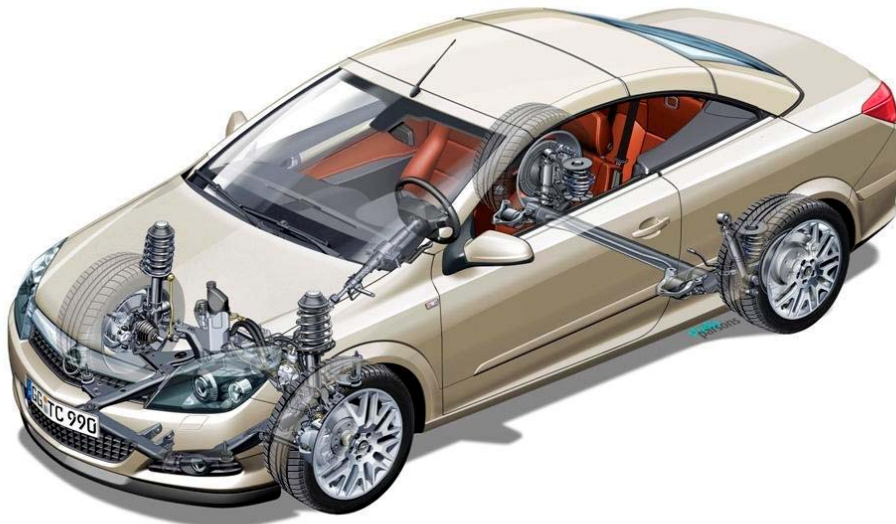


Figura 2.1: Esquema del sistema de amortiguación en un Opel Astra

La función más importante de la suspensión es absorber las irregularidades del terreno por el que circula el vehículo, favoreciendo la estabilidad y direccionalidad del mismo manteniendo el contacto entre neumático y calzada. Si estas irregularidades son pequeñas, el mismo neumático las puede absorber; si son considerables, se hace necesaria una unión elástica que absorba el impacto. A su vez, la suspensión proporciona mayor comodidad a los pasajeros.

Además de esta misión, un sistema de suspensión debe cumplir las siguientes funciones complementarias:

- Transmitir las fuerzas de aceleración y de frenada entre los ejes y el bastidor.
- Resistir el par motor y el par de frenada y las aceleraciones en las curvas.
- Conservar el ángulo de dirección en todo el recorrido, paralelismo entre ejes y la perpendicularidad del bastidor.
- Soportar el peso y la carga del vehículo.
- Proporcionar estabilidad adecuada ante los diferentes movimientos de la carrocería.

Cuando un automóvil sufre un golpe en una rueda por una irregularidad se transmite al chasis, produciendo oscilaciones en el vehículo. Una mala conducción o un reparto no equilibrado de las cargas pueden provocar también estos movimientos. Para definir cada movimiento, éste se descompone en los ejes del automóvil (figura 2.2):

- El empuje es una oscilación en torno al eje vertical. Se produce al circular por un terreno ondulado.
- El cabeceo es una oscilación respecto al eje transversal. Tiene lugar en aceleraciones y frenadas bruscas.
- El balanceo es una oscilación en torno al eje longitudinal que está presente en los cambios bruscos de dirección.

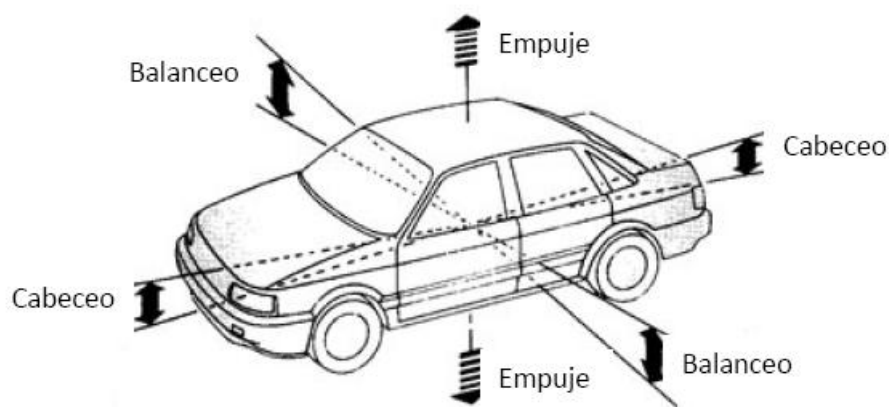


Figura 2.2: Movimientos de la carrocería en un vehículo

Para el diseño de un sistema de suspensión se deben tener en cuenta dos objetivos primordiales: confort y seguridad. Cuanto más blanda sea la suspensión, mayor confort en el pasajero; mientras que cuanto más dura, mayor agarre del neumático al terreno, es decir, mayor seguridad.

Un sistema de suspensión debe poseer dos propiedades tan importantes como elasticidad y amortiguación.

Según estudios empíricos, se concluye que la frecuencia ω que mejor soporta el ser humano está entre 1 y 2 Hz (1 y 0,5 segundos de frecuencia, respectivamente). Por debajo de este rango de frecuencias, la sensación es lentamente acompasada y puede inducir a mareos. Por encima de 2 Hz las aceleraciones verticales que sufre un cuerpo son intolerables para un periodo largo de tiempo.

- FENÓMENO DE RESONANCIA

Una suspensión entra en resonancia cuando el cociente entre la frecuencia de la masa suspendida del vehículo ω_A (ecuación 2.1) y la frecuencia de las oscilaciones de la calzada ω_0 se aproxima a 1 (ecuación 2.2). Cuanto más se aproxime a la unidad, mayor amplificación del movimiento de cabeceo, pudiendo llegar a ser peligroso para la seguridad del automóvil.

$$\omega_A = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.1)$$

Donde ω_A es la frecuencia del sistema [rad/s], k su rigidez [N/m] y m su masa [kg].

$$\frac{\omega_A}{\omega_0} \sim 1 \rightarrow \text{Resonancia mecánica} \quad (2.2)$$

En estas circunstancias un cuerpo vibra, aumentando de forma progresiva la amplitud del movimiento tras cada una de las actuaciones sucesivas de la fuerza (figura 2.3). Este efecto puede ser destructivo para algunos materiales rígidos [27].

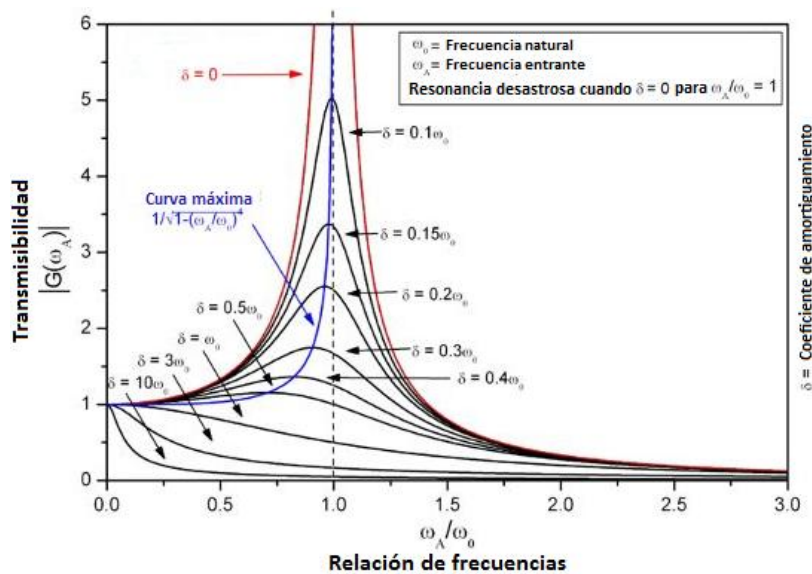


Figura 2.3: Fenómeno de resonancia en una gráfica transmisibilidad-relación de frecuencias

- AMORTIGUAMIENTO CRÍTICO

Para cuantificar el confort y la estabilidad de un conjunto vehicular en función del valor de amortiguación se recurre al valor de amortiguación crítica del vehículo.

En la segunda ley de Newton (ecuación 2.3), si se sustituye el desplazamiento x por un movimiento oscilatorio (ecuación 2.4).

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{d v}{dt} = m \cdot \frac{d x^2}{dt^2} \quad (2.3)$$

$$x = A \cdot \cos(\omega \cdot T + \varphi_0) \quad (2.4)$$

Si se añade un amortiguador, además de tener en cuenta la rigidez (Hooke) se tiene una fuerza amortiguadora F_a a añadir que contrarresta a F (ecuaciones 2.5 y 2.6).

$$F_a = -c \cdot \frac{d x}{dt} \quad (2.5)$$

$$m \cdot \frac{d x^2}{dt^2} = -k \cdot x - c \cdot \frac{d x}{dt} \quad (2.6)$$

Se trata de una ecuación diferencial ordinaria lineal de segundo orden, cuyas soluciones se agrupan en tres tipos de amortiguamiento:

Si $c^2 - 4 \cdot k \cdot m > 0$, el sistema es sobreamortiguado y su amortiguamiento es muy fuerte.

Si $c^2 - 4 \cdot k \cdot m < 0$, el sistema oscila con amplitud decreciente o con amortiguamiento débil.

Si $c^2 - 4 \cdot k \cdot m = 0$, el sistema posee amortiguamiento crítico.

Cuando se tiene amortiguamiento crítico, la única solución posible es la ecuación 2.7.

$$x = A_1 \cdot e^{-\frac{b}{2 \cdot m} \cdot t} + A_2 \cdot t \cdot e^{-\frac{b}{2 \cdot m} \cdot t} \quad (2.7)$$

Donde A_1 y A_2 son parámetros que dependen de las condiciones iniciales del sistema.

El amortiguamiento crítico corresponde al valor de amortiguamiento que permite a un sistema con desplazamiento inicial volver a su posición inicial sin oscilación alguna. Si se disminuyera la amortiguación crítica, tendería más rápidamente al equilibrio, pero tomaría valores positivos y negativos del desplazamiento (figura 2.4).

Cuanto más se aproxime la suspensión al valor de amortiguamiento crítico, mejor es su estabilidad y peor su confort. Por contra, cuanto más se aleje el valor al crítico menor es su estabilidad y mejor su confort [28].

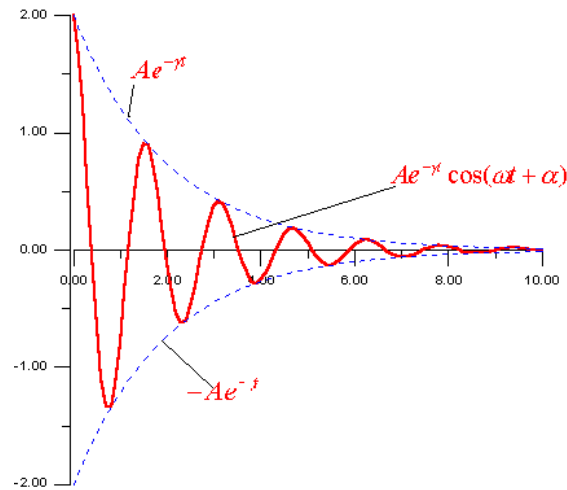


Figura 2.4: Curva del amortiguamiento crítico (discontinua azul)

2.2. ELEMENTOS DE LA SUSPENSIÓN

Se pueden recoger los elementos de cualquier sistema de suspensión en cuatro grandes grupos:

- Elementos elásticos, tales como muelles helicoidales, ballestas o barras de torsión.
- Elementos de amortiguación, de fricción y hidráulicos.
- Elementos constructivos, como los silentblocks, brazos o rótulas.
- Elementos que mejoran el comportamiento vehicular como barras estabilizadoras o tirantes de reacción.

2.2.1. REQUISITOS

Los elementos de la suspensión deben soportar el peso del vehículo y han de ser lo suficientemente robustos para que no sufran deformaciones permanentes. También deben asegurar el contacto entre ruedas y terreno salvando los baches, hoyos y resaltos que el terreno pueda ofrecer. Las oscilaciones que sufre el vehículo dependen de la rigidez del muelle. Si el muelle es muy rígido habrá menor amplitud pero mayor número de oscilaciones. En cambio, si el muelle es poco rígido existirá mayor amplitud en detrimento del número de repeticiones.

Por otro lado, como la masa del vehículo es variable, resulta imposible diseñar una suspensión ideal, ya que para cada masa existe una suspensión óptima. Como solución, se diseña una suspensión basada en la máxima masa que soporta el automóvil para que ésta funcione en todo tipo de condiciones [1, 2].

2.2.2. ELEMENTOS ELASTICOS

Los elementos elásticos se encargan de absorber los impactos que recibe el vehículo en su movimiento, mejorando el confort, la seguridad, la estabilidad y la capacidad para controlar el automóvil. Soportan el peso del vehículo y permiten el desplazamiento relativo entre bastidor y ruedas.

Los cuatro tipos de elementos elásticos que se detallan a continuación son: ballestas, muelles helicoidales, barras de torsión y fuelles hidráulicos [1, 2, 3, 6, 7].

2.2.2.1. Ballestas

Las ballestas están formadas por un grupo de láminas longitudinales de acero resistente y elástico, unidas mediante abrazaderas que permiten el deslizamiento relativo entre láminas cuando hay deformación al absorber impactos. La primera y la más larga es la maestra, cuyos extremos se unen al bastidor mediante bulones o pernos. El resto de láminas se van haciendo cada vez más pequeñas y curvadas. Todas van unidas por un perno *capuccino*, tornillo pasante con tuerca en su punto medio (figura 2.5).

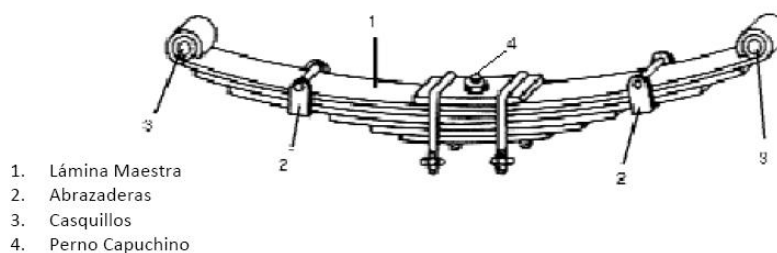


Figura 2.5: Elementos de una ballesta

Las láminas de las ballestas tienden a enderezarse o ponerse rectas cuando absorben las irregularidades del terreno. Por ello, hay que tener en cuenta la curvatura de las láminas en el cálculo y el montaje de este tipo de elementos.

Pueden ser montadas de forma longitudinal o transversal (figura 2.6). En el montaje longitudinal, el más usado, se coloca una ballesta por rueda en sentido de avance. Cada una se une por un lado a un punto fijo y por el otro a uno móvil. En la instalación transversal, usada en turismos y todo-terrenos, los extremos de la ballesta se unen al puente mediante gemelas y la base de la ballesta al bastidor.



Figura 2.6: Montaje longitudinal y transversal de una ballesta

Como ventaja del sistema de ballestas destaca el correcto funcionamiento con una lámina rota, su rigidez transversal y longitudinal, así como la capacidad para soportar grandes cargas. Son baratas y de fácil construcción.

Su principal inconveniente es la instalación en el eje delantero (montaje longitudinal) porque limitan el ángulo de orientación de la rueda y su peso. Además, requieren lubricación y limpieza.

Las ballestas pueden clasificarse en dos grupos: semielípticas y parabólicas. Las primeras llevan las hojas en contacto y requieren lubricar, mientras que en la segunda las hojas no se tocan entre sí, existiendo un espacio entre ellas que ocupa unos separadores de material compuesto o nylon. Además, no requieren mantenimiento y son más flexibles.

Las ballestas han ido poco a poco desapareciendo del mercado, siendo sustituidas por otro tipo de muelles. Por ello, en la actualidad su uso está limitado a vehículos de gran tonelaje, todo-terrenos y escasos turismos.

2.2.2.2. Muelles helicoidales

Los muelles utilizados en vehículos consisten en un arrollamiento en hélice de un hilo de acero cuyo diámetro está comprendido entre 10 y 15 mm, en cuyos extremos las espiras están refrentadas para el buen asentamiento entre amortiguador y carrocería.

La rigidez del muelle (ecuación 2.8) depende del diámetro del hilo y del muelle, número de espiras, diámetro del muelle (figura 2.7), y características del acero (módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson).

$$k = \frac{d^4 \cdot G}{8 \cdot D^3 \cdot N} \quad (2.8)$$

Donde la rigidez del muelle es k , el diámetro del hilo es d ; el módulo de rigidez G ; el diámetro medio del muelle D y el número de espiras N .

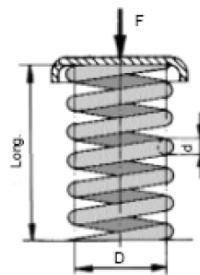


Figura 2.7: Características de un resorte helicoidal

Se pueden variar los parámetros del resorte para conseguir que se comporte de maneras diferentes con muelles de paso variable, forma cónica o con muelles en paralelo de longitud libre distinta. En la figura 2.8 se puede apreciar estos tipos de resortes.



Figura 2.8: Resorte normal, de paso variable y cónico

Entre las ventajas de los muelles helicoidales destaca su gran elasticidad y recorrido en un espacio pequeño, que no requieren mantenimiento y su bajo peso.

El principal inconveniente que presentan es la pequeña rigidez transversal, por lo que se hace necesario completar la suspensión con dispositivos que impidan el movimiento transversal de la carrocería respecto a los ejes.

2.2.2.3. Barras de torsión

La barra de torsión es un elemento de acero que conecta los ejes de la suspensión con el fin de reducir el movimiento del chasis causado por una fuerte demanda de giros. Actúa como un resorte de torsión, donde los impactos son absorbidos al torcerse la barra de acero sobre su eje longitudinal. Además, se puede conectar a un tercer punto, estableciendo un triángulo que aumenta su efecto estabilizador (figura 2.9).



Figura 2.9: Descripción del movimiento de una barra de torsión

Para montar esta barra en el vehículo se une fijando un extremo al chasis y otro a una palanca solidaria a la barra unida en su extremo libre al eje de la rueda. Cuando el automóvil atraviese una irregularidad, la barra tenderá a deformarse torsionalmente y permitirá el giro de la rueda.

Las barras de torsión tienen dos posibles disposiciones (figura 2.10): longitudinalmente o transversalmente al eje del bastidor y pueden ir montadas en el eje delantero o en el trasero.

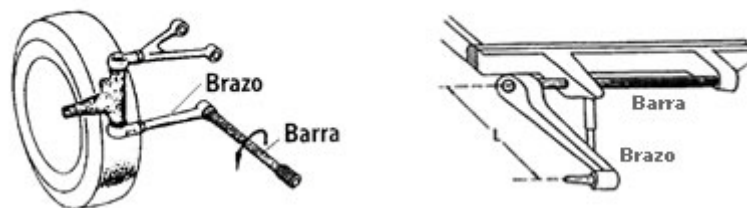


Figura 2.10: Montaje longitudinal (izquierda) y transversal (derecha) de una barra de torsión

2.2.3. ELEMENTOS DE AMORTIGUACIÓN

El amortiguador es el encargado de disminuir el número, la amplitud y la frecuencia de las oscilaciones que producen los elementos elásticos. En el caso en el que no existan elementos elásticos, el amortiguador hace doble función absorber toda la vibración y disminuirla hasta el reposo.

Los tipos de amortiguadores que se explican en los siguientes apartados son el de fricción y el telescópico, que se divide a su vez en los monotubo, los bitubo y con electroválvulas [3, 6].

2.2.3.1. Fricción

Este tipo de amortiguador, como se puede ver en la figura 2.11, se basa en la disipación de la energía en forma de calor que por el rozamiento de unos discos de fricción absorbe las irregularidades que puedan darse. Posee dos brazos, uno se une a la rueda y otro al bastidor y el movimiento relativo produce fricción entre dos o más discos de acero que se unen alternados en un eje común.

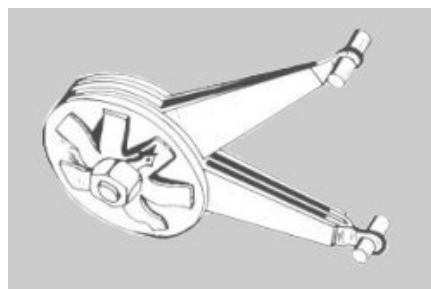


Figura 2.11: Amortiguador de fricción

El mayor inconveniente de este tipo de amortiguadores es que si se supera la fuerza de fricción que ejercen los amortiguadores, la fuerza amortiguadora disminuye con la velocidad (en lugar de aumentar, que es lo que se pretende). Además, su comportamiento varía con el desgaste por lo que requiere mantenimiento periódico.

Este tipo de amortiguador ha desaparecido prácticamente del mercado, sustituido por los telescópicos, más sofisticados y eficientes.

2.2.3.2. Hidráulicos

Los amortiguadores hidráulicos se dividen normalmente en dos tipos: los monotubo y los bitubo.

a) Amortiguadores bitubo

Los amortiguadores de doble tubo pueden ser de dos clases, presurizados, cuyo fluido suele ser aceite y no presurizados, cuyo fluido puede ser un gas o un aceite.

Constan de dos cámaras: una interior y otra de reserva. Además, poseen válvulas en el pistón y en la base del amortiguador. Los componentes principales comunes a ambos tipos son:

- Tubo y cámara exterior o de reserva.
- Tubo y cámara interior o cilindro.
- Pistón.
- Válvula de pie.
- Guía del vástago.
- Acoplamiento superior e inferior.

La figura 2.12 muestra tres planos de corte de tres amortiguadores de doble tubo, en sus variantes presurizado y no presurizado.

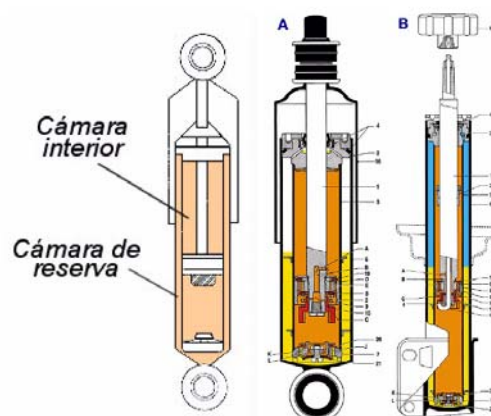


Figura 2.12: Esquema de un amortiguador bitubo (A no presurizado, B presurizado)



El funcionamiento del amortiguador bitubo consta de dos carreras:

- Carrera de compresión. El vástago penetra en el fluido de la cámara interior y fluye sin resistencia a través de los orificios y la válvula de no-retorno hacia el espacio al otro lado del pistón. Simultáneamente, una cierta cantidad de fluido se ve desplazada por el volumen que el vástago va ocupando en la cámara interior. Este fluido pasa por la válvula de pie de manera forzada hacia la cámara de reserva (llena de aire o gas a presión). La fuerza de amortiguamiento viene dada por la resistencia que impone la válvula de pie al paso del fluido.
- Carrera de extensión. Al tirar del vástago hacia fuera el aceite que queda por encima del pistón se comprime y pasa a través de las válvulas que hay en él. La resistencia que el fluido encuentra en dichas válvulas es la fuerza de amortiguamiento de extensión. El fluido que había llegado de la cámara de reserva vuelve sin hallar resistencia por la válvula de pie a la cámara interior para compensar el volumen liberado por el vástago.

➤ No presurizados

Los amortiguadores no presurizados poseen una desventaja respecto a los presurizados, ya que se pueden formar bolsas de aire en tres condiciones: posición horizontal, que la columna de fluido de la cámara principal cae por acción de la gravedad tras un periodo de equilibrio mantenido o que el fluido se contraiga debido a su enfriamiento y succione aire hacia la cámara principal.

➤ Presurizados

Los amortiguadores presurizados poseen un tipo de configuración que mejora las prestaciones de los amortiguadores bitubo convencionales. La solución consiste en añadir una cámara de gas a baja presión, donde la fuerza de compresión la sigue proporcionando la válvula de pie. De esta forma, la fuerza de extensión realizada por el amortiguador en su posición nominal es baja. Esto permite utilizar diámetros más elevados. Posee ciertas ventajas respecto a los no presurizados:

- Respuesta de la válvula más sensible para pequeñas amplitudes.
- Mejor confort de marcha.
- Mejores propiedades de amortiguación.
- Reducción de ruido.
- Operatividad pese a pérdidas de gas.
- Menor longitud y fricción a igualdad de condiciones.

b) Amortiguadores monotubo

Los amortiguadores monotubo aparecen después de los bitubo y se utilizan en vehículos de altas prestaciones. Constan de dos cámaras principales (figuras 2.13 y 2.14) una con un fluido y otra con gas a presión, separadas por un pistón flotante donde se encuentran las válvulas.

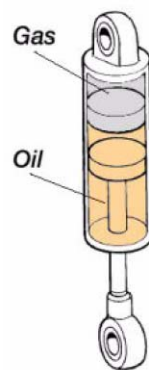


Figura 2.13: Esquema de una amortiguador monotubo

Los componentes de los que consta son:

- Tubo de presión.
- Pistón acoplado al vástago.
- Pistón flotante.
- Guía del vástago.
- Acoplamiento superior e inferior.

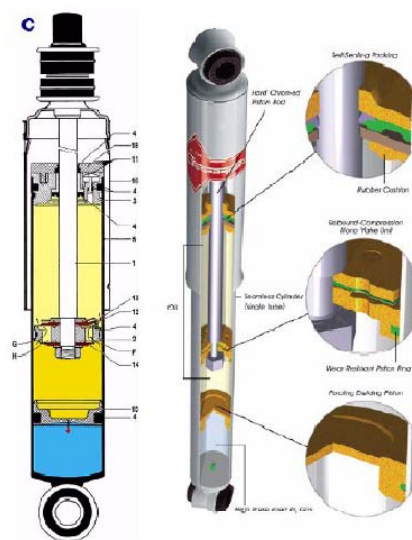


Figura 2.14: Esquema completo de un amortiguador monotubo

El funcionamiento del amortiguador monotubo es ligeramente diferente al que tiene el amortiguador bitubo. Si bien, consta de las mismas carreras:



- Carrera de compresión. A diferencia del bitubo el amortiguador monotubo no tiene cámara de reserva. El problema de ubicar el fluido que ocupa el espacio tomado por el vástago al penetrar se soluciona con una cámara de volumen variable. Mediante el pistón flotante se consigue dividir la cámara inferior en dos zonas: una la del fluido y otro con gas presurizado a alta presión. Al empujar el vástago hacia dentro, la presión que ejerce el fluido sobre dicho pistón flotante hace que la zona de gas se comprima, aumentando la presión a ambos lados. De esta manera, el fluido se ve obligado a pasar a través de las válvulas del pistón. La fuerza de amortiguamiento es función de la resistencia que encuentre el fluido a su paso por estas válvulas.
- Carrera de extensión. Al tirar del vástago hacia fuera, el fluido que queda encima del pistón se comprime y pasa a través de las válvulas que hay en él. La resistencia que el fluido encuentra a su paso por dichas válvulas es la fuerza de amortiguamiento de extensión. Debido a la disminución de la presión en la cámara, el pistón flotante vuelve hacia arriba recobrando su posición original y compensando el volumen liberado por el vástago.

Las ventajas de los amortiguadores monotubo frente a los bitubo:

- Mejor refrigeración gracias a que la cámara tiene contacto directo con el aire. Esto supone más eficacia a la hora de disipar energía cinética.
- El nivel del fluido no baja en equilibrio, evitando problemas en la puesta en marcha.
- No posee problemas de cavitación ya que el fluido no forma espuma ni en vibraciones de alta frecuencia.
- Posibilidad de colocarse en posición horizontal.

Las desventajas son las que se enuncian a continuación:

- Mayor coste.
- Valvulería más compleja.
- Dificultad de regulación de la suspensión.

c) Amortiguadores con electroválvulas.

Los amortiguadores de electroválvulas permiten variar, a voluntad del conductor, los pasos calibrados de aceite entre cámaras, de manera que se puede conseguir una suspensión más segura pero menos confortable o menos segura y más cómoda, según los requerimientos del vehículo en cada momento.

Las electroválvulas se encuentran conectadas a una centralita electrónica de donde reciben diversa información del vehículo, por ejemplo, la velocidad del vehículo, aceleraciones longitudinales, verticales y transversales, etc.

Las informaciones que recibe de los sensores son analizadas por el computador electrónico que compara estas informaciones con los valores que tiene almacenados en su interior. Cuando sobrepasa algunos de estos valores actúa sobre las electroválvulas y hace variar los orificios calibrados del amortiguador.

Este amortiguador (figura 2.15) está compuesto por tres cámaras (A, B y C) conectadas por pequeños orificios. H e I conectan las cámaras A y B, mientras que J y K conectan la cámara B con la C. Luego, dos electroválvulas EV1 y EV2 conectan, cuando el computador electrónico ordena su apertura, las cámaras A y C. La apertura y cierre de estas electroválvulas es función de los parámetros que recibe el computador de los sensores.

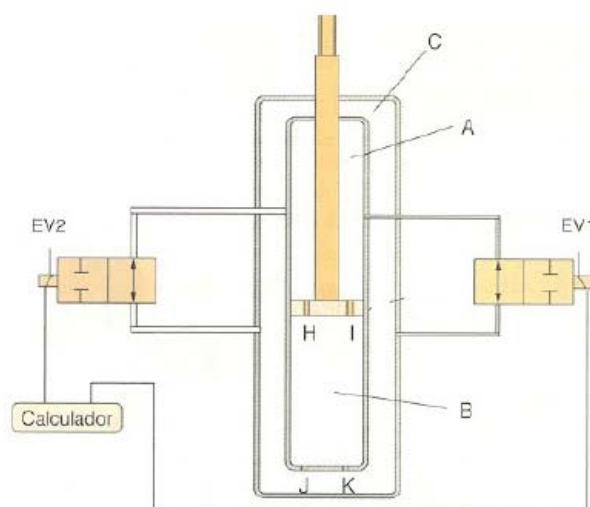


Figura 2.15: Esquema de un amortiguador con electroválvulas

El comportamiento del vehículo es diferente según la acción de las electroválvulas en cada momento.

Se comportará de manera confortable cuando la electroválvula EV1 esté cerrada y EV2 abierta. Se permite el paso de aceite de la cámara A a la B por los orificios H e I. De A a C mediante EV2 y, finalmente, de B a C mediante J y K.

Para una suspensión algo más dura, EV1 se abre y EV2 se cierra. Así, el paso de la cámara A a la C se hace un poco más difícil.

Por último, para una suspensión más deportiva, las dos electroválvulas permanecen cerradas. De este modo, se corta la comunicación entre las cámaras A y C por las electroválvulas y sólo permanece entre A y B y entre B y C. Así, el recorrido del émbolo es frenado en sus movimientos de compresión y distensión debido a la dificultad de paso de aceite por los orificios H e I. Se consigue así un tarado muy duro con gran estabilidad pero con disminución de confort.

Este tipo de amortiguadores tienen la ventaja de poder cambiar el coeficiente de amortiguación según las propiedades del terreno o las especificaciones requeridas, pero por el contrario necesitan ser alimentados con electricidad para el funcionamiento de los sensores y las electroválvulas. Por este motivo, su uso queda restringido a vehículos de gran potencia.

2.2.4. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

Además de los elementos de amortiguación y elásticos, el sistema de suspensión necesita elementos de unión entre sus elementos, las ruedas y el bastidor.

La función de estos elementos es absorber los esfuerzos de tracción del motor y transmitirlos a la carrocería, así como los esfuerzos del eje directriz y los esfuerzos producidos de la conducción [3, 6].

2.2.4.1. Casquillo, *silentblock* o cojinete elástico

Se trata de unos elementos de goma vulcanizada utilizados para unir las suspensiones al chasis. Deben tener buen aislamiento. Se muestra un ejemplo en la figura 2.16.

Las ventajas del *silentblock* son su buena amortiguación y que no requiere apenas mantenimiento. Los inconvenientes son su sensibilidad a la temperatura, a las inclemencias del tiempo, a los químicos y al aceite.



Figura 2.16: Detalle del casquillo de una suspensión

2.2.4.2. Trapecio o brazo de la suspensión

Este elemento es una barra de acero que soporta al vehículo por y se une a la mangueta y buje, conteniendo entre ambos los elementos de guiado para soportar mejor los esfuerzos generados por el automóvil (figura 2.17).

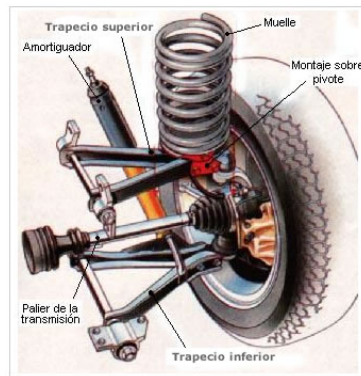


Figura 2.17: Situación de los trapezoides en el sistema de suspensión

2.2.4.3. Tirante

Se trata de unos brazos de acero, transversales o longitudinales, situados entre el trapecio y la mangueta que funcionan como elementos de soporte y guiado. También absorben los esfuerzos y desplazamientos de los demás elementos a través de los cojinetes elásticos.

2.2.5. ELEMENTOS DE MEJORA

Además de todos los elementos explicados en apartados anteriores, existen elementos que acoplados a un sistema de suspensión mejoran el comportamiento dinámico del vehículo. Algunos de ellos se explican a continuación [1, 2, 3, 6].

2.2.5.1. Barras estabilizadoras

Se trata de unas barras de acero, normalmente en forma de U que mejoran la dinámica del vehículo. Hay dos tipos de montaje: transversal y longitudinal.

El montaje transversal, también conocidas como barra *Panhard* o barra antibalanceo evita, como su propio nombre indica, las posibles oscilaciones laterales (balanceos) que se producen, por ejemplo, en un giro brusco. Su funcionamiento se basa en el trabajo de resistencia a torsión frente a dicho balanceo.

El montaje longitudinal mejora los desplazamientos originados entre la masa suspendida y no suspendida ante esfuerzos que comprometan el cabeceo del vehículo (aceleraciones y frenadas bruscas).

2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

Los sistemas de suspensión se pueden clasificar según cuatro criterios: geometría, componentes, elementos constructivos y sistemas de control.

Primero se va a exponer la clasificación respecto a la geometría, esto es la capacidad que tienen las ruedas opuestas de girar con independencia una de la otra. En segundo lugar se describe la ordenación respecto del sistema de control que dirige la suspensión.

2.3.1. SEGÚN LA GEOMETRÍA

En esta clasificación se encuentran tres tipos de sistemas de suspensión. El primero es la rígida con ruedas unidas por un elemento rígido. El segundo tipo es la semirrígida, donde existe sólo una transmisión parcial de las oscilaciones de una rueda a otra. Por último, las suspensiones independientes donde, como el propio nombre indica, cada rueda tiene un sistema de suspensión independiente del resto de ruedas.

2.3.1.1. Rígida

También conocida como sistema dependiente, las ruedas están unidas mediante un elemento rígido que transmite todo el movimiento de una rueda a la otra [3, 7]. Tal y como se muestra en la figura 2.18 donde la inclinación de una rueda afecta directamente a la otra rueda del eje. El eje va unido al bastidor mediante la suspensión instalada en paralelo, lo cual provoca que la inclinación del eje se transmite a todo el conjunto.

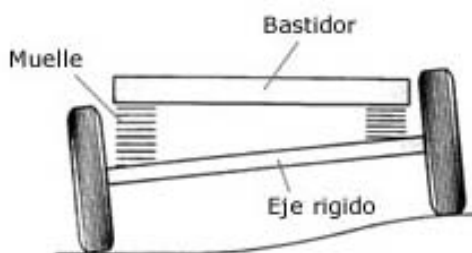


Figura 2.18: Esquema simplificado de la suspensión rígida

El inconveniente de este tipo de suspensiones es obvio: las vibraciones de un lado del pavimento se transmiten al otro lado del eje. Además, el peso del eje rígido, y grupo cónico diferencial si hubiera, aumenta el total de las masas no suspendidas.

Las ventajas son su sencillez de diseño y su capacidad de no producir variaciones importantes en los parámetros de la rueda como caída o avance.

El uso de este tipo de suspensiones se restringe a vehículos industriales, camiones de bajo y gran tonelaje, todo-terrenos y vehículos de gran capacidad en general. En la figura 2.19 se muestra la composición de una suspensión trasera.



Figura 2.19: Composición de una suspensión rígida trasera

2.3.1.2. Semirrígida

Estas suspensiones se diferencian de las rígidas en que, aún estando unidas de forma rígida, las oscilaciones se transmiten de manera parcial.

Existen dos tipos de suspensiones semirrígidas que destacan sobre el resto, las de “eje de Dion” y la suspensión con “eje torsional” [3, 7].

a) Eje de Dion

En esta clase de suspensión (figura 2.20), las ruedas van unidas mediante soportes al grupo diferencial que es masa suspendida en este montaje, es decir, va anclado al bastidor. El giro se transmite, entonces, mediante dos semiejes denominados palieres como en las suspensiones independientes. A la vez que esto, las ruedas van unidas entre sí mediante una traviesa o tubo de Dion que las ancla de forma rígida. Los deslizamientos longitudinales están limitados por unos brazos longitudinales.

La ventaja de este tipo de montaje es que se disminuye la masa no suspendida frente a la suspensión rígida porque el eje de Dion es más ligero que un eje normal. Además, debido al anclaje rígido de la traviesa, mantiene los parámetros de la rueda casi constantes.

El inconveniente es su elevado coste, lo que provoca poca utilidad en el mercado actual.



Figura 2.20: Esquema de una suspensión semirrígida con eje de Dion

b) Eje torsional

Este tipo de suspensión (figura 2.21) se emplea en el eje trasero de vehículos con tracción delantera. La traviesa que une las dos ruedas tiene forma de “U”. Así, es capaz de deformarse angularmente cuando una de las ruedas encuentra una irregularidad y volver a la posición inicial una vez absorbida.

Las ruedas están unidas rígidamente a dos brazos longitudinales unidos por un travesaño que se deforma cuando las sacudidas no son simétricas dando estabilidad al vehículo. Debido a la torsión del puente, esta configuración provoca una recuperación parcial del ángulo de caída que unido al bajo coste, bajo peso y pequeño espacio de instalación hace de este tipo de suspensión una de las más usadas en vehículos de gama media-baja.

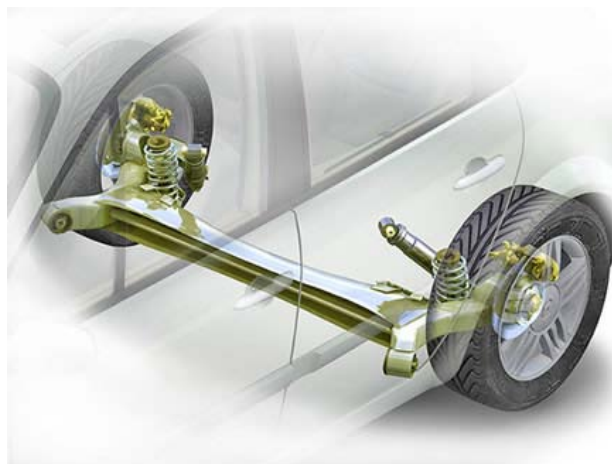


Figura 2.21: Esquema de una suspensión semirrígida de eje torsional

2.3.1.3. Independiente

En la suspensión independiente cada una de las ruedas lleva una suspensión independiente, es decir, los movimientos del conjunto rueda-suspensión no van a afectar a los otros conjuntos rueda-suspensión de vehículo. La ventaja principal es que la masa suspendida de este tipo de sistema es muy bajo, lo que conlleva que las

acciones transmitidas al chasis sean de menor magnitud. La desventaja de este tipo de suspensión es que no se puede usar para cargas elevadas porque presenta problemas, tiene un diseño complejo y posee un alto coste.

Esta configuración es la que ofrece una mejor opción desde el punto de vista confort-estabilidad.

En la actualidad sólo se emplea en las ruedas del eje directriz, aunque poco a poco se va implantando en los dos ejes.

Existen varios tipos de suspensión independiente entre las que destacan la suspensión de eje oscilante, de brazos tirados o arrastrados, McPherson, de paralelogramo deformable y multibrazo o multilink. Se desarrollan en los siguientes apartados [3, 4, 7].

a) Suspensión eje oscilante

Este sistema tiene la singularidad de que el elemento de rodadura y el semieje son solidarios (salvo el giro de la rueda), de forma que el conjunto oscila alrededor de una articulación próxima al plano medio longitudinal del vehículo (figura 2.22). Esta configuración no se puede usar en el eje directriz porque el movimiento oscilatorio de los ejes altera el ángulo de caída de las ruedas en las curvas.

Una variante de este sistema es el concebido con una sola articulación que usa Mercedes-Benz para sus modelos más convencionales. La ventaja de esto es que el pivote de giro está a menor altura que en el eje oscilante de dos articulaciones. El mecanismo del diferencial oscila con uno de los palieres mientras que el otro se mueve a través de una articulación que también permite desplazamiento axial en el árbol de transmisión.

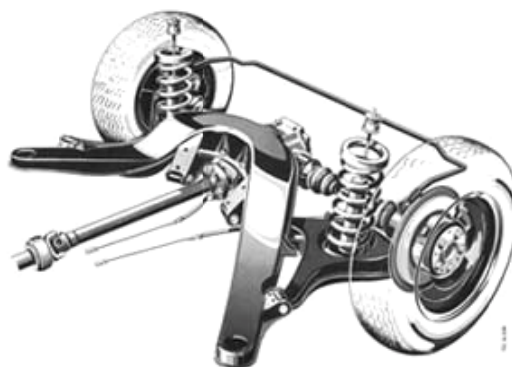


Figura 2.22: Esquema de una suspensión de eje oscilante

b) Suspensión de brazos tirados o arrastrados

La suspensión de brazos tirados (figura 2.23) realiza la unión de la rueda y el bastidor mediante una articulación delante del eje, mediante dos elementos soporte, llamados “brazos”, que en su parte anterior está unido al bastidor y en la posterior a la rueda. Las ruedas son tiradas o arrastradas por los brazos longitudinales que pivotan en el anclaje de la carrocería.

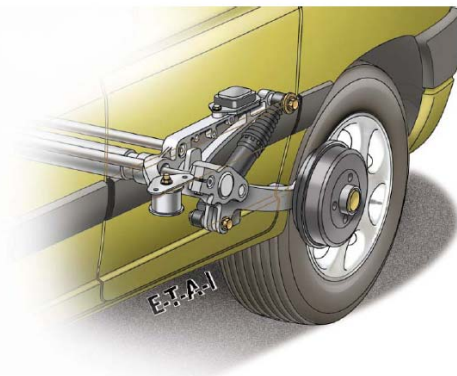


Figura 2.23: Esquema de suspensión de brazos arrastrados

La unión puede ser con un punto de unión, “brazo”, o con dos puntos de unión, triángulo, o varios puntos montadas con varios brazos independientes.

Este tipo de sistema de suspensión presenta una variante conocida como “de brazos semi-arrastrados” (figura 2.24). Su ventaja es que no necesitan estabilizadores longitudinales debido a la componente longitudinal que tiene el propio brazo. Como permite la variación durante la marcha de la caída y el avance de las ruedas, se mejora la estabilidad del automóvil.



Figura 2.24: Suspensión de brazos semiarrastrados

c) Suspensión McPherson

El nombre por el que se conoce esta suspensión se le debe a la persona que inventó este sistema: Earle S. McPherson, ingeniero de Ford.

Este sistema es el más compacto y liviano. Por ello, es el más utilizado en el eje delantero de los automóviles, ayudando a un menor consumo de carburante, un menor número de componentes en el sistema ahorrando coste y espacio, además de lograr un sistema de tracción delantera más sencilla (figura 2.25).



Figura 2.25: Esquema simplificado de la suspensión McPherson

El requerimiento de esta suspensión es que la carrocería debe ser más resistente en los puntos donde se fijan amortiguadores y muelles, para absorber los esfuerzos transmitidos por la suspensión.

d) Suspensión de paralelogramo deformable

La suspensión de paralelo deformable, trapecio articulado o de triángulos superpuestos es, junto con la McPherson, la más usada en un gran número de automóviles tanto para el tren delantero como el trasero.

El paralelogramo deformable está formado por dos brazos transversales, la mangueta de la rueda y el propio bastidor. Los elementos de unión entre la rueda y la carrocería son elementos transversales colocados en distintos planos (figura 2.26). Su nombre se debe a los primeros sistemas desarrollados con este tipo de tecnología, puesto que con dos elementos superpuestos paralelos, junto con rueda y carrocería, recuerdan la forma de un paralelogramo.

La evolución de estos sistemas de suspensión de paralelogramo deformable son los sistemas de suspensión multibrazo, que se explican en el siguiente apartado.

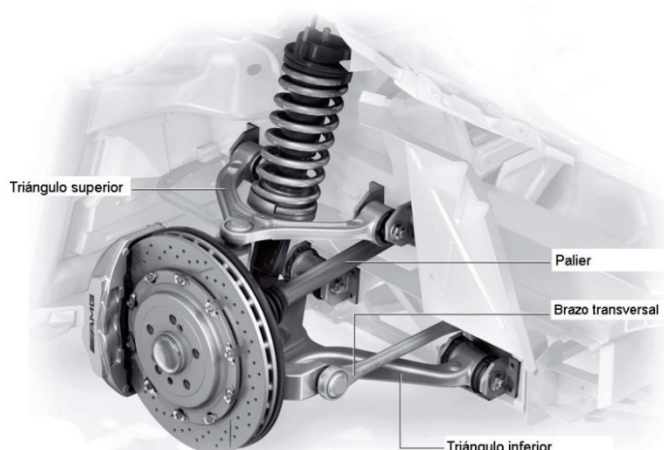


Figura 2.26: Esquema de una suspensión de paralelo deformable

e) Suspensión multibrazo o *multilink*

La diferencia que aporta este tipo de suspensiones es que los elementos guía pueden poseer anclajes elásticos (manguitos de goma). Así, las multibrazo pueden modificar los parámetros de la rueda en cuanto a caída y convergencia para dar más estabilidad al vehículo en situaciones comprometidas.

Se pueden clasificar en dos grupos: con elementos guía transversales u oblicuos (figura 2.27), con funcionamiento similar a los de paralelogramo deformable, y de brazos de guía longitudinal, cuyo montaje recuerda a la suspensión de brazos arrastrados longitudinalmente.



Figura 2.27: Esquema de una suspensión multibrazo delantero de un Audi A6

2.3.1.4. Otros tipos de suspensión

Además de las suspensiones que constan de amortiguador y muelle helicoidal, existen otras con otro tipo de montaje. Su presencia en el mercado es baja y se trata de sistemas muy particulares. A continuación, se explican tres de ellas: la suspensión hidroneumática, la neumática y la conjugada.

a) Suspensión hidroneumática

Este tipo de suspensión tiene bastante poco que ver con una suspensión habitual. Se trata de unas esferas que sustituyen al conjunto muelle-amortiguador en cuyo interior se encuentra aire y fluido, separados por una membrana, a una cierta presión. Este fluido es empujado por una bomba y está unido a las cuatro esferas, una por rueda del vehículo (algunos van equipados con hasta cinco esferas). Cuando se transita por una irregularidad, la presión del fluido aumenta, lo que hace aumentar la presión del aire, que absorbe las irregularidades para volverse a expandir de nuevo [5] (figura 2.28).

Este sistema adopta la ventaja de poder nivelar el vehículo y ajustar la rigidez de la suspensión mediante el sistema de aire comprimido.

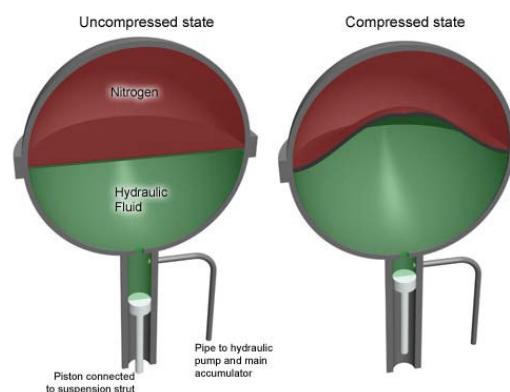


Figura 2.28: Esquema del funcionamiento de la suspensión hidroneumáticas

b) Suspensión neumática

Este tipo de suspensión (figura 2.29) se usa, sobre todo, en vehículos de alta gama desde hace pocos años. El funcionamiento se basa en que el aire a presión sustituye al muelle, ballesta o barra de torsión por un fuelle o cojín de aire capaz de variar su rigidez.

Las ventajas de una suspensión neumática son la posibilidad de adaptar la carrocería a distintas alturas dependiendo de la necesidad del terreno y la amortiguación a la forma de conducir.

Posee una elevada flexibilidad, notable capacidad de amortiguación de las vibraciones y autorregulación del sistema que permite mantener constante la distancia chasis-terreno, independientemente de la carga [5].

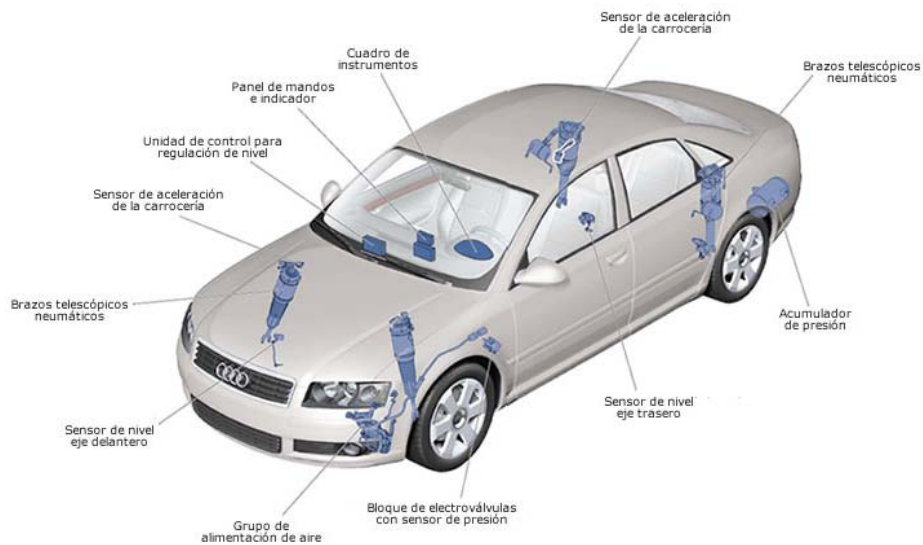


Figura 2.29: Componentes de una suspensión neumática de un Audi A8

2.3.2. SEGÚN EL SISTEMA DE CONTROL

Si se clasifican a día de hoy las suspensiones acorde al sistema de control que rige el funcionamiento se encuentran tres grupos: activas, pasivas y semiactivas. Estos tipos se desarrollan a continuación.

2.3.2.1. Suspensión pasiva

Los elementos descritos en apartados anteriores son los que formarían un sistema de suspensión de este tipo (figura 2.30). Su uso está muy generalizado por menor coste, aunque presentan una difícil adecuación entre confort del pasajero y seguridad del vehículo. Esto se debe a que cuanto mayor nivel de confort, el sistema deberá ser más flexible para absorber lo que el terreno le exige al vehículo y esta flexibilidad repercute negativamente en el terreno. Cuanto más blanda sea la suspensión, mayor será el balanceo y desplazamiento de las masas suspendidas.

Este tipo de suspensión no es recomendable cuando se requieran unos niveles altos de seguridad porque repercutirá en la rigidez del sistema de suspensión y, por tanto, en el confort de los pasajeros [1, 5].

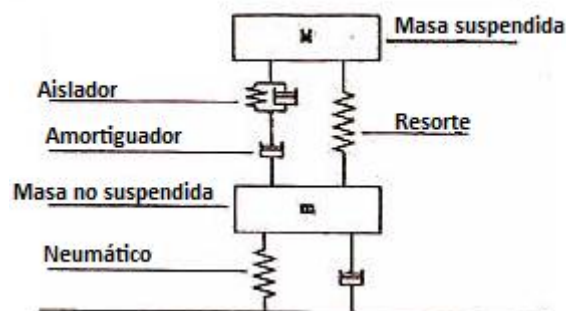


Figura 2.30: Esquema de una suspensión pasiva

2.3.2.2. Suspensión activa

Las suspensiones activas (figura 2.31) surgen como solución a la necesidad de crear vehículos que combinen un alto nivel de confort con un alto grado de seguridad, eliminando balanceo en curva y cabeceo en frenada manteniendo los neumáticos en permanente contacto con el pavimento.

Se le llama suspensión activa porque es capaz de almacenar, disipar e introducir energía en el sistema. Así, se ajusta en cada instante a las solicitaciones cambiantes de la carretera, debido a distintos sensores que recogen información que un actuador interpreta y corrige.

Un ordenador indica a un dispositivo ubicado en cada rueda cuándo, de qué modo, a cuánta distancia y a qué velocidad debe moverse. Esto significa que los movimientos de las ruedas ya no están sujetos a interacciones aleatorias entre carretera y los distintos elementos que componen la suspensión. Los sensores se encargan de medir velocidad del vehículo, aceleraciones longitudinales y laterales, fuerzas y aceleraciones que actúan sobre cada rueda. Así, el actuador toma la decisión idónea para el buen comportamiento del vehículo.

La mayor ventaja frente a la suspensión pasiva es el control independiente de cada rueda, consiguiendo mayor adherencia de las ruedas al terreno a la vez que un reposicionamiento perfecto de la carrocería, por lo que el confort también es óptimo. El inconveniente es el elevado coste, sobre todo en la implantación de altas frecuencias [1, 5].

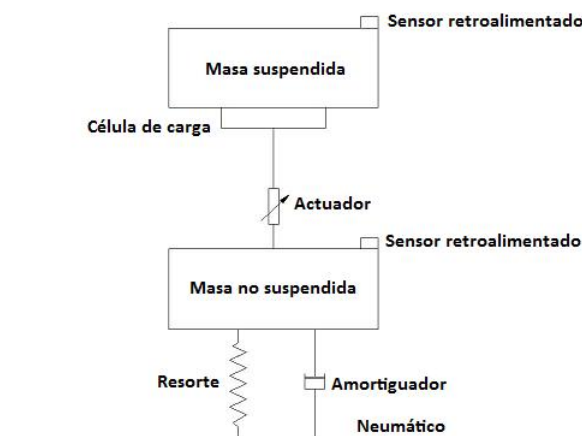


Figura 2.31: Esquema simplificado de una suspensión activa

2.3.2.3. Suspensión semiactiva

Este tipo de suspensión es la más usada hoy en día en vehículos de alta gama. Funcionan como una suspensión pasiva en altas frecuencias y como una activa en bajas frecuencias (hasta 5 Hz), por lo que no necesitan barras estabilizadoras.

Existen diversos sistemas de suspensión semiactiva. Sin embargo, se puede hacer una clasificación generalizada atendiendo al control de la posición: uno mediante actuadores y otra mediante una suspensión adaptativa.

El sistema de actuadores proporciona un continuo seguimiento cuando el vehículo se inclina debido a frenadas y aceleraciones, o cuando se traza una curva. Así, se pueden corregir los problemas de posicionamiento del vehículo y evitar la pérdida de control. Sus componentes principales son tres: sensores, microprocesador y un sistema de servomecanismos hidráulicos dotado de retroalimentación automática que permite corregir el funcionamiento del vehículo respecto su dinámica lateral y longitudinal. El microprocesador recupera la información obtenida por los sensores y manda la información oportuna a los servomecanismos. Los sensores necesarios en el sistema son uno de peso para las variaciones de masa, cinco sensores para medir variaciones en aceleración y deceleración, y cuatro hidráulicos para medir variaciones de presión hidráulicas. El sistema electrónico monitoriza el balanceo y cabeceo, calculando con una frecuencia de 100 Hz las fuerzas de compensación a aplicar por los cilindros hidráulicos.

-**Active Body Control** (Mercedes-Benz) es uno de los sistemas semiactivos más sofisticados para vehículos comerciales. Su disposición se puede apreciar en la figura 2.32.

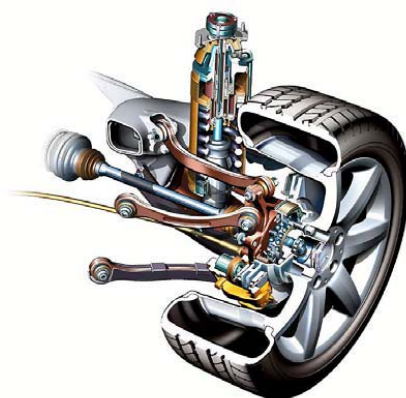


Figura 2.32: Detalle del sistema de suspensión Active Body Control de Mercedes-Benz

Por otro lado, los sistemas de suspensión adaptativos son aquellos en los que se puede modificar la constante de rigidez o amortiguación en función de las necesidades del vehículo, mediante actuadores. Existen diversas marcas que incorporan en sus vehículos suspensiones adaptativas, cada compañía con sus pequeños matices. A continuación se describen algunos de ellos:

-**Airmatic Dual Control** (Mercedes-Benz) (figura 2.33). Se trata de una evolución de la suspensión neumática adaptativa que ya montaban en sus modelos clase S. En él, se actúa sobre la rigidez de los muelles y la amortiguación [1, 2].



Figura 2.33: Sistema de suspensión Airmatic Dual Control del Mercedes clase E

-**Four-C o Continuously Controlled Chassis Concept** (Volvo). Significa concepto de chasis de control continuo. De la misma manera que Mercedes, Volvo incorpora un sistema de amortiguación controlado electrónicamente mediante tecnología Öhlins [1, 2].

-**Electronic Damping Control** (BMW). Este sistema varía la flexibilidad de los amortiguadores de forma continua. El aspecto de este sistema se puede observar en la figura 2.34 [1, 2].



Figura 2.34: Sistema de suspensión Electronic Damping Control de BMW

-**Computer Active Technology Suspension** (Jaguar). Consigue un ajuste automático de la dureza de los amortiguadores electrónicamente mediante una señal sensorial.

Las ventajas de este tipo de suspensiones son varias. La primera, es que permite una marcha ajustable y optimizada, por lo que se consigue el mejor rendimiento en la conducción y el confort.

Otra ventaja es la posibilidad de seleccionar la firmeza de la suspensión dependiendo de las condiciones del terreno transitado.

Por último, el dimensionado de este tipo de sistemas es comparable con el de las suspensiones tradicionales [1, 2].

El inconveniente que presentan estos dos tipos de amortiguadores, tanto el de sistema de actuadores como el sistema de control adaptativo; es que trabaja con tiempos de respuesta muy altos (entre 100 y 200 milisegundos aproximadamente). Este tiempo de respuesta, que es más alto que el tiempo de muestreo del controlador, genera una fuerza de control distinta a la deseada. Por tanto, su uso no es del todo óptimo.

Como solución a este problema y en busca de sistemas con tiempos de respuesta más bajos, se encuentra la cada vez más creciente incorporación de elementos controlados mediante materiales con “efecto memoria”. Dentro de este tipo de elementos están fluidos electro-reológicos y magneto-reológicos, que pueden modificar su viscosidad por la aplicación de un campo eléctrico y magnético, respectivamente. Este fluido está formado por microesferas metálicas mezcladas con fluidos compuestos de hidrocarburos sintéticos [1, 2, 3, 5].

Este tipo de fluidos, que se desarrolla en el tercer capítulo de este proyecto, puede alcanzar tiempos de respuesta inferiores a 25 milisegundos. En la figura 2.35 se puede apreciar el corte longitudinal de un amortiguador magneto-reológico [3].



Figura 2.35: Vista en corte longitudinal de un amortiguador magneto-reológico



CAPÍTULO 3

LOS FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS



3.1. INTRODUCCIÓN A LA REOLOGÍA

El término reología fue acuñado en el año 1929 por Eugene Cook Bingham. Se refiere a la ciencia que estudia la deformación de sustancias que, bajo el efecto de fuerzas externas, no obedecen ni a la Ley de Newton ni a la Ley de Hooke. Esta ciencia está presente en la industria plástica, alimentaria, de lubricantes o de pinturas.

El origen de la reología se remonta a mediados del siglo XVII, cuando Isaac Newton y Robert Hooke publicaron sus teorías sobre los fluidos viscosos y los sólidos elásticos, respectivamente.

A finales del siglo XVII Newton definió el líquido viscoso, cuya viscosidad se puede considerar constante. Su curva de tensión-deformación es lineal y pasa por el origen.

El rozamiento en un flujo unidimensional de un fluido newtoniano se puede representar en la ecuación 3.1.

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dt} \quad (3.1)$$

Donde τ es la tensión tangencial ejercida en un punto del fluido o sobre una superficie sólida en contacto con el mismo [Pa], μ es la viscosidad dinámica del fluido y sólo depende de la temperatura [Pa·s] y $\frac{dv}{dt}$ es el gradiente de velocidad perpendicular a la dirección del plano en el que se está calculando la tensión tangencial [s^{-1}].

La ecuación constitutiva que relaciona el tensor tensión y el gradiente de velocidad y la presión en un fluido newtoniano se expone en la ecuación 3.2.

$$\sigma_{ij} = -p \cdot \delta_{ij} + \mu \cdot \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \cdot \delta_{ij} \nabla \cdot v \right) \quad (3.2)$$

Donde σ es la tensión [Pa]; p la presión del fluido [Pa]; μ la viscosidad [Pa·s]; $\frac{\partial v}{\partial x}$ es el gradiente de velocidad perpendicular a la dirección del plano en el que se calcula la tensión.

En el fluido newtoniano no existe recuperación de la forma original después de un estado tensional. Sin embargo, el sólido elástico de Hooke sí que recupera su forma primitiva después de aplicar una carga, siempre y cuando no se haya sobrepasado el límite elástico E . Esta ley, en el caso unidimensional, obedece a la ecuación 3.3.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.3)$$

Donde σ es la tensión aplicada [Pa]; ε la deformación porcentual [%] y E el módulo de Young o de elasticidad [Pa]. Esta ley sólo es válida en la zona elástica del material. Una vez sobrepasado el régimen elástico el comportamiento es completamente distinto, existiendo deformaciones permanentes.

En la actualidad, la reología moderna estudia, además de comportamientos viscosos y elásticos, sistemas complejos que presentan simultáneamente propiedades elásticas y viscosas, es decir, sustancias viscoelásticas [24].

3.1.1. PROPIEDADES REOLÓGICAS

Las propiedades reológicas de cualquier fluido dependen de diversos términos: concentración y densidad de las partículas, distribuciones de forma y tamaño de las partículas así como de las propiedades del fluido portador de dichas partículas, entre otros. Esta interdependencia puede llegar a resultar muy compleja de definir, por lo que es muy importante el establecimiento de metodologías que optimicen el desempeño de estos fluidos para aplicaciones particulares.

Los dispositivos amortiguadores son muy importantes para el control de vibraciones, tal y como se explica en el capítulo dos. Los amortiguadores de fluido viscoso se basan en las propiedades constantes del fluido que incorporan para contrarrestar las vibraciones, con la desventaja de que el coeficiente de amortiguamiento y el valor de la fuerza generada son constantes, ya que dependen de esas propiedades invariables.

En consecuencia a esto, surgen los amortiguadores magneto-reológicos, dispositivos en cuyo interior circula un fluido magneto-reológico capaz de cambiar sus propiedades mediante un estímulo magnético que adapta la viscosidad del fluido a los requerimientos que el sistema necesite para el control de vibraciones [1, 24].

En la figura 3.1 se puede apreciar el esfuerzo de corte de cuatro fluidos magnéticos distintos en función de la densidad de flujo a una velocidad de corte máxima de 26 s^{-1} . Esta densidad de flujo es la relación entre la velocidad que experimenta el fluido con la distancia que recorre. El orden ascendente de los registros se debe a un incremento de la fracción de volumen de hierro. La figura refleja cómo la viscosidad del fluido en ausencia de un campo magnético varía significativamente en función del aceite portador, de la concentración de partículas y de los agentes de la suspensión.

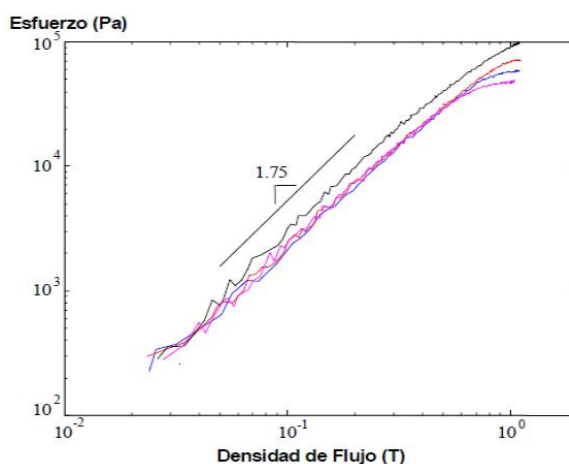


Figura 3.1: Esfuerzo de corte en función de la densidad de flujo

En la figura 3.2 se muestra el esfuerzo de corte o viscosidad de cuatro fluidos magnéticos, como función de la velocidad de corte. Cuanto mayor es la velocidad de corte menor es la viscosidad del fluido, aunque no es estrictamente proporcional a la carga de hierro.

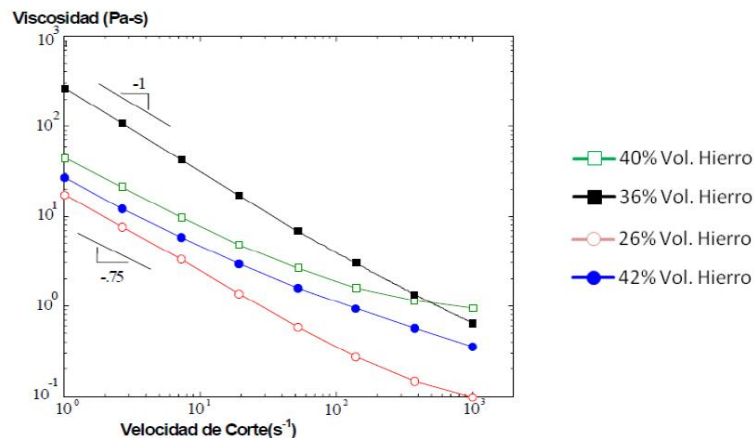


Figura 3.2: Viscosidad como función de la velocidad de corte

3.1.2. APLICACIÓN DEL ESTUDIO DE LA REOLOGÍA

Los procesos industriales en los que está presente la reología implementando los conocimientos actuales de esta ciencia son los siguientes [25]:

- Control de calidad de los alimentos, que se realiza en la propia línea de producción.
- Estudio de la textura y consistencia de productos alimenticios, cuyas propiedades son muy importantes para que el producto sea del agrado del consumidor.
- Industria de pegamentos y sustancias pegajosas, plasticidad de fluidos, forma de fluir dentro del recipiente y estabilidad una vez aplicado.
- Producción de medicamentos, desde su estabilidad química, caducidad y forma de procesarlos.
- Caracterización de elastómeros y de polímeros tipo PVC.
- Estabilidad de emulsiones y suspensiones.
- Caracterización de hidrocarburos.
- Estudio del magma en vulcanología, puesto que cuanto menos viscoso sea el magma, mayor es la probabilidad de erupción (mayor movimiento tendrá el fluido).
- Control de sustancias transportadas en un recipiente cilíndrico, como por ejemplo una cisterna.



3.2. MATERIALES INTELIGENTES

En la actualidad, el vocablo “inteligente” se ha adoptado como un modo correcto para calificar y describir a una clase de materiales que presentan la capacidad de cambiar sus propiedades físicas tales como la rigidez, la viscosidad, la forma, el color, etc. en presencia de un estímulo concreto.

Hoy en día, no existe un criterio para aplicar este término a cualquier material, pero sí que consta un acuerdo en los criterios que deben presentar dichos materiales. Estos criterios o condiciones son las siguientes:

- Presentan sensores de reconocimiento y medida de la intensidad del estímulo ante el que reaccionará el material para obtener datos y poder decidir cuándo y cuánto estimular el fluido.
- A su vez presentan “actuadores”, embebidos o intrínsecos, que responden ante dicho estímulo.
- Para controlar la respuesta, que debe tener un tiempo muy pequeño, presentan mecanismos de control y selección de la misma.
- El sistema regresa a su estado original en cuanto cesa el estímulo.

Así, se puede definir un sistema inteligente como un “sistema o material que presenta sensores, ‘actuadores’ y mecanismos de control, intrínsecos o embebidos, por los cuales es capaz de sentir un estímulo, de responder ante él de una forma predeterminada en un tiempo apropiado y de volver a su estado original tan pronto como el estímulo cesa”.

A continuación se describen los materiales inteligentes usados más comúnmente en la industria.

3.2.1. MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA

El efecto memoria de forma puede describirse como la capacidad de un material para cambiar su forma ante un estímulo externo, y sea capaz de recuperar esa forma una vez cese el estímulo. Este estímulo puede ser un campo magnético, un campo eléctrico, una carga, etc.

En la figura 3.3 se puede observar la representación esquematizada y simplificada de los estados por los que pasa un material con memoria de forma cuando varía debido a la actuación de un estímulo.

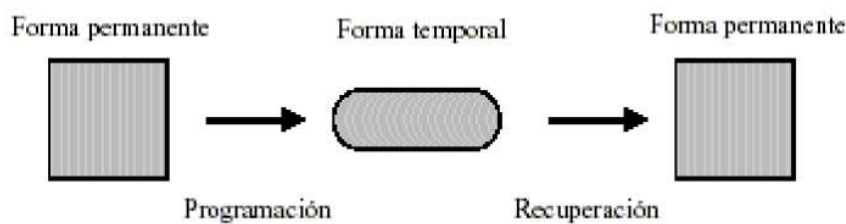


Figura 3.3: Proceso de estados de un material inteligente de forma

Existen cuatro tipos de materiales con memoria de forma según la naturaleza del material o del estímulo externo al que responden. Se desarrollan brevemente a continuación [9, 11].

-Aleaciones con memoria de forma (Shape memory alloys o SMAs), cuyo efecto memoria se basa en la transición que se produce entre dos fases sólidas: una de baja temperatura (martensítica) y otra de alta temperatura (austenítica).

-Aleaciones ferromagnéticas con memoria de forma (Ferromagnetic shape memory alloys, FSMAs), que constituyen un nuevo tipo de materiales que sufren el efecto memoria de forma bajo la aplicación de diferentes campos magnéticos. El comportamiento es similar a las aleaciones con memoria de forma pero el estímulo al que responden, en vez de ser temperatura, es un campo magnético aplicado.

-Polímeros con memoria de forma (Shape memory polymers o SMPs), que poseen la capacidad de recordar su forma original. Ésto se relaciona con la combinación de estructura y morfología del polímero y además, con el proceso y tecnología de programación de inclusión de la forma, es decir, hace falta una preparación especial del polímero para que ‘recuerde’ una forma determinada.

-Cerámicas con memoria de forma (Shape memory ceramics o SMCs), cuya definición atiende a la de un material inorgánico, no metálico, empleando arcillas y otros minerales naturales o procesados químicamente.

3.2.2. MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS Y ELECTROELECTRIVOS

Estos materiales son capaces de adquirir un campo eléctrico cuando se les somete a esfuerzos mecánicos. Este efecto eléctrico es consecuencia del esfuerzo producido monotómicamente y tiende a crecer a medida que se aplica el campo de deformación administrado (efecto piezoeléctrico). Por ello, destaca su habilidad para proveer una simple, silenciosa y rápida respuesta entre controles eléctricos y sistemas mecánicos. Estos materiales tienen la misma propiedad a la inversa, es decir, tienen a deformarse cuando se le aplica un determinado voltaje. A este efecto se le conoce como electrostrictivo.

También existen materiales que funcionan igual que los piezoeléctricos y electrostrictivos, pero con cargas magnéticas. Éstos responden de la misma manera ante campos magnéticos y, al deformarse, son capaces de crear un campo magnético. Se denominan materiales piezomagnético y magnetostrictivo [3].



3.2.3. MATERIALES CROMOACTIVOS Y FOTOACTIVOS

Los **materiales cromoactivos** son aquellos en los que se dan cambios de color cuando se produce algún fenómeno externo tal como un cambio de temperatura, una radiación, una corriente eléctrica, un campo magnético, etc.

En cambio, los **materiales fotoactivos** son aquellos en los que se producen cambios de diferente naturaleza como consecuencia de la acción de la luz. Éstos son los siguientes [9]:

- Los materiales electroluminiscentes son sustancias organometálicas que emiten luz de diferentes colores cuando son estimulados por una corriente eléctrica.
- Los materiales fosforescentes son sustancias semiconductoras que transforma la energía absorbida en luz visible en la oscuridad cuando cesa la excitación. Se basa en las propiedades del fósforo.
- Los materiales fluorescentes son materia semiconductora que emite luz como consecuencia de la activación con luz UV. Se basa en las propiedades del flúor.

3.2.4. MATERIALES ELECTRO-REOLÓGICOS Y MAGNETO-REOLÓGICOS

Estos dos tipos de fluidos se basan en los mismos principios. La diferencia estriba en el estímulo que los somete a respuesta.

Los fluidos electro-reológicos y magneto-reológicos son aquellos que varían sus propiedades ante la presencia de un campo eléctrico y un campo magnético, respectivamente. El motivo es la formación de estructuras dentro del fluido como consecuencia de los estímulos aplicados. Los fluidos magneto-reológicos son suspensiones acuosas de microesferas súper-paramagnéticas con gránulos de magnetita dispersos en una matriz polimérica. Las partículas no tienen remanencia ni histéresis magnética.

En el caso de los fluidos magneto-reológicos, bajo la acción del campo magnético, las partículas adquieren un momento dipolar que genera una interacción dipolar entre ellas. Por ello, produce la agregación de partículas en forma de collares de cuentas alineados con el campo magnético. Esta formación cambia completa e instantáneamente las propiedades mecánicas y ópticas.

Hoy en día se encuentran dos tipos de fluidos, unos formados por partículas dispersas y otro por fluidos homogéneos. Los formados por partículas dispersas reaccionan debido a la agregación de las partículas en suspensión provocada por la polarización de los materiales. Sin embargo, los fluidos homogéneos permiten mayores miniaturizaciones porque carecen de éstas, por lo que son perfectas para aplicaciones en microtecnología.

Las partículas dispersas de los fluidos magneto-reológicos poseen unas dimensiones de entre 0,05 y 8 μm de diámetro. Estas estructuras restringen la movilidad del fluido, volviéndose una estructura rígida como consecuencia del aumento de la viscosidad. Cuanto mayor sea el campo

magnético, mayor será la energía mecánica necesaria para romper dichas estructuras. En la figura 3.4 se puede observar el efecto comentado sobre el campo velocidades del fluido. Cuando el campo magnético se aplica perpendicularmente al campo velocidad, se forman cadenas y éstas son las que se oponen al movimiento mediante la aparición de esfuerzos. Ante los esfuerzos inferiores al de fluencia, el fluido reológico responde como un sólido viscoelástico. Por todo esto, se puede concluir que para conseguir una velocidad de deformación determinada es necesario un esfuerzo viscoso superior al que correspondería en caso de un fluido newtoniano. Este esfuerzo se puede controlar mediante la intensidad de campo aplicado.

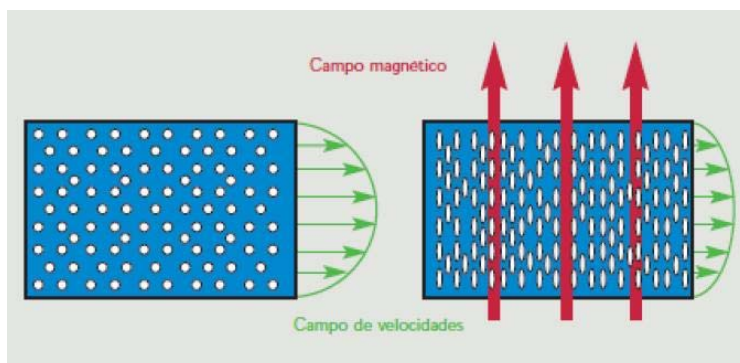


Figura 3.4: Campo de velocidades en un fluido magnético

En la figura 3.5 se puede observar como el esfuerzo no viscoso se debe a que el esfuerzo de fluencia crece al aumentar la intensidad de campo aplicado.

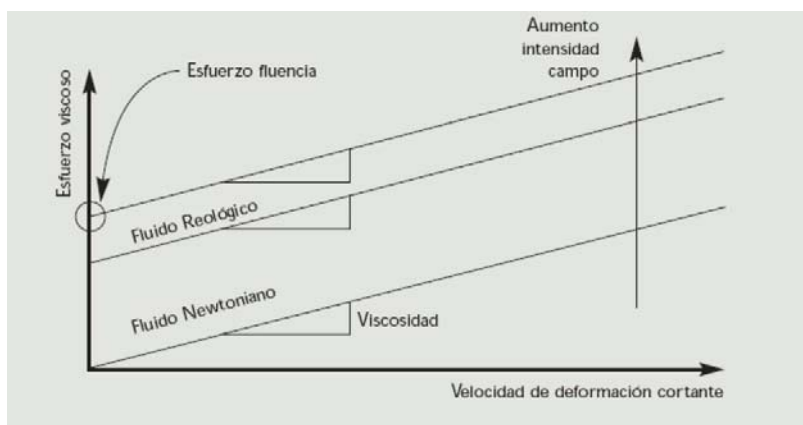


Figura 3.5: Relación del esfuerzo viscoso y la velocidad de deformación

Para diseñar un fluido magneto-reológico, se debe tener en cuenta el aceite base de la solución, la naturaleza del material en suspensión, los aditivos necesarios y verificar la estabilidad del fluido ante la agregación de partículas, con el objeto de que el fluido responda eficientemente ante el campo magnético [2, 5].



Las propiedades más en comunes en los fluidos magneto-reológicos se enuncian en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Propiedades de un fluido magneto-reológico común

Propiedad	Magnitud
Máximo esfuerzo cortante	50 - 100 kPa
Máximo campo magnético admisible	≈ 250 kA/m
Viscosidad aparente	0,1 - 10 Pa·s
Rango de temperatura de operación	40 - 150 °C
Estabilidad	Insensible a impurezas
Densidad	3-4 g/cm ³

3.3. APLICACIONES EN COMÚN DE LA REOLOGÍA

Las aplicaciones en las que se usan estos materiales inteligentes en la actualidad abarcan diversos campos y aplicaciones industriales, la mayoría de ellas usadas en sensores o actuadores.

Los sensores se fabrican con este tipo de materiales empleando como señal de entrada distintos campos y, en base a ellos, los materiales responden con señales de salida fácilmente medibles que suelen ir ligado a campos eléctricos, ya sea por diferencia de potencial o por campos que indiquen corriente eléctrica.

Los actuadores emplean como señales de entrada campos eléctricos, térmicos o magnéticos y mediante las propiedades del material activo son transformadas en una señal de salida mecánica, tal como un campo de desplazamientos, deformaciones o esfuerzos. Dicha generación de fuerza puede ser utilizada para realizar un cierto trabajo.

Si destaca algún material inteligente sobre otro, se puede decir que son los piezoeléctricos y electrostrictivos los más versátiles, puesto que pueden operar como sensor y actuador indistintamente. Sin embargo, las aleaciones de forma sólo pueden emplearse como actuadores y no como sensores.

Por otra parte, los fluidos reológicos se emplean principalmente en aplicaciones muy específicas relacionadas con el amortiguamiento activo, frenado, protección antisísmica y protección de operadores de maquinaria generadora de vibraciones. Además, destaca también su uso en la medicina ortopédica [11, 24].

Las aplicaciones más importantes en las que los fluidos magneto-reológicos están presentes se explican en los siguientes apartados.

3.3.1. CONTROL DE VIBRACIÓN SÍSMICA EN ESTRUCTURAS

La tecnología actual de dispositivos magneto-reológicos se adapta a tantos campos de aplicación que ha permitido diseñar amortiguadores válidos para estructuras civiles con una fuerza máxima de amortiguamiento de 200 kN. Estos dispositivos son usados, sobre todo, en países con gran actividad sísmica como los situados en el círculo de fuego del Océano Pacífico.

En la figura 3.6 se puede observar el modelo de un amortiguador magneto-reológico utilizado en estructuras.

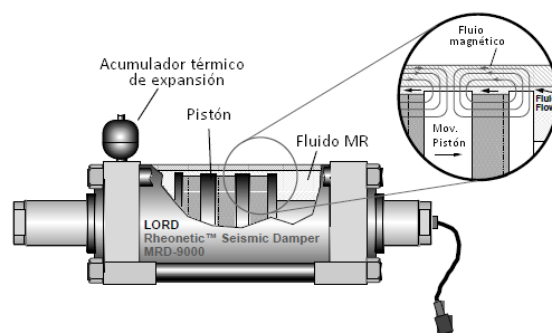


Figura 3.6: Amortiguador magneto-reológico para estructuras civiles

3.3.2. SUSPENSIÓN DE ASIENTOS DE VEHÍCULOS INDUSTRIALES

Se usan sistemas de suspensión en este tipo de vehículos para el control en tiempo real de la posición óptima para la conducción. Esto se consigue con una unidad de control que modifica la intensidad del campo magnético en función del peso del conductor, niveles de choque y vibraciones debidas al terreno por el que vehículo pesado circula [26].

La figura 3.7 ilustra un amortiguador de fluido magneto-reológico diseñado para utilizarse en la suspensión semiactiva de un asiento de un vehículo de larga travesía. Así, se reduce la fatiga del conductor y, en consecuencia, también el riesgo de accidente.

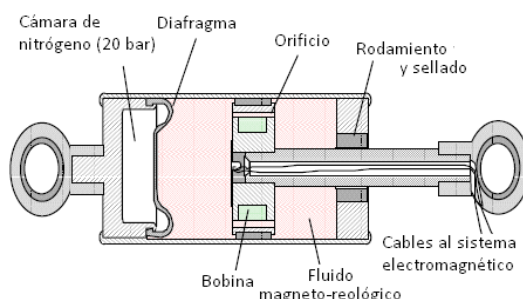


Figura 3.7: Amortiguador magneto-reológico para asientos de vehículos industriales (Rheonetic RD-1001-4)

3.3.3. AMORTIGUACIÓN DE VIBRACIONES INDUSTRIALES

El uso de estos amortiguadores es muy importante porque las vibraciones industriales pueden causar daños estructurales a edificios y molestias a los que trabajan en ellos. Por ello, estos dispositivos reducen sus efectos en la medida de lo posible [26].

El dispositivo utiliza las propiedades del fluido viscoso para proveer una fuerza que contrarreste los efectos de la vibración.

La figura 3.8 muestra el esquema de un amortiguador de vibraciones industriales.

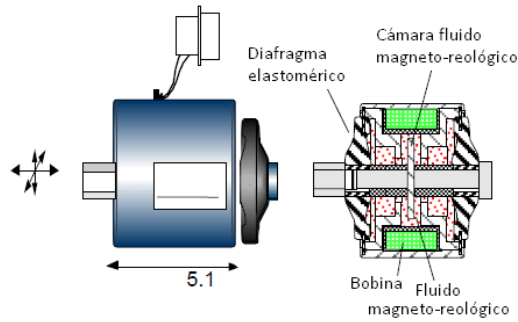


Figura 3.8: Amortiguador para vibraciones industriales (Rheonetic-1013-1)

3.3.4. FRENOS MAGNETO-REOLÓGICOS ROTATIVOS

Este tipo de frenos permiten un control continuo del par de torsión porque la corriente en las espiras es cero, no hay campo magnético, por lo que el par de torsión es mínimo a causa del cierre hermético y la viscosidad del fluido. Al crear un campo magnético se produce un par de torsión cuyo valor máximo depende de la máxima corriente que pueda soportar el freno. En general, son de diseño simple y fácil manejo [3]. Los elementos que lo componen se ilustran en la figura 3.9:

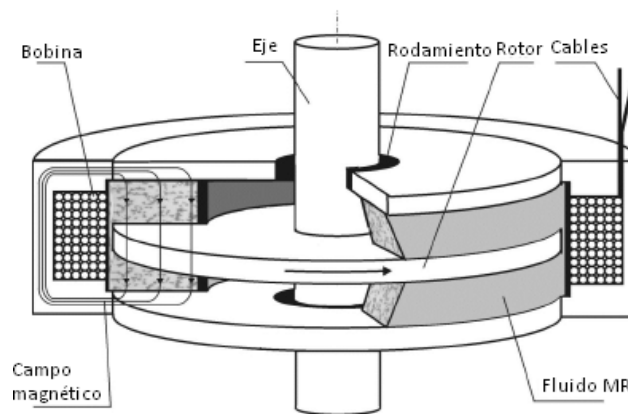


Figura 3.9: Esquema de un freno magneto-reológico

3.4. EL AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

El primer fabricante que desarrolló un sistema de amortiguación basado en fluidos reológicos para automóviles fue Delphi, cuya presentación tuvo lugar en 1999. Este sistema consistía en una suspensión semiactiva con amortiguador de fluido magneto-reológico llamado "Magnetic Ride" (figura 3.10). La diferencia respecto a otros sistemas estriba en su interior: el líquido que circula por el vástago contiene aproximadamente el 40% de partículas metálicas en suspensión. Posee, también, bobinas electromagnéticas, sensores que detectan desplazamientos y aceleraciones (longitudinal y transversal) y una unidad de mando.

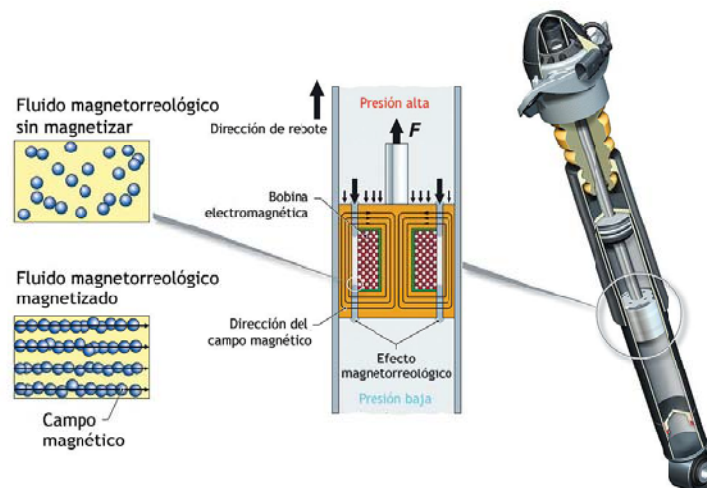


Figura 3.10: Estructura de un amortiguador Magnetic-Ride de Delphi

La consistencia de esta suspensión depende de la intensidad del campo magnético que se aplique. El funcionamiento es el siguiente: los sensores de desplazamiento envían señales a la unidad de mando que aplica una intensidad de corriente a cada amortiguador en función de la señal recibida de cada sensor. Esta intensidad de corriente es recibida por la bobina electromagnética del amortiguador, variando el campo magnético y, por tanto, cambiando la densidad y la viscosidad del fluido magneto-reológico.

Los valores de consistencia del fluido MR cambian unas mil veces por segundo, es decir, se ajusta inmediatamente a los requerimientos del vehículo con un tiempo de respuesta ínfimo. También se adapta a las necesidades de la conducción, dependiendo del firme debido a que el sensor de aceleración hace que se adapte a las aceleraciones, frenadas y movimientos oscilatorios de la carrocería.

Dependiendo de la circunstancia en la que se encuentre el vehículo, éste reacciona de una determinada manera. En el caso de una frenada brusca eleva la dureza mediante el campo magnético de la suspensión delantera, aumentando la estabilidad. Si se produce una aceleración aumenta la dureza de la suspensión trasera evitando el hundimiento de esta parte (cabeceo). En las curvas, los amortiguadores que incrementan su dureza son los exteriores para que el coche no se balancee.

En la actualidad, este tipo de amortiguadores se usan en vehículos de altas prestaciones y de lujo. Algunos ejemplos de automóviles con este sistema de suspensión son el Chevrolet Corvette, Audi R8 TT (figuras 3.11 y 3.12), Cadillac Seville o Ferrari 599 GTB [1, 2].



Figura 3.11: Sistema de suspensión Magnetic Ride en el Audi R8

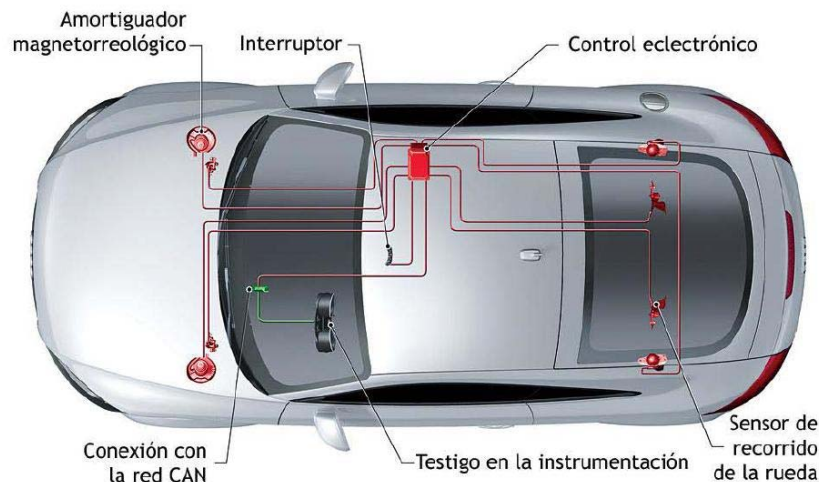


Figura 3.12: Esquema electrónico del sistema de suspensión del Audi R8.

Las ventajas de esta suspensión frente a la convencional es su rapidez (diez veces más rápida que una convencional), la variación de la viscosidad del líquido de hasta mil veces por segundo, no requiere gran mantenimiento, permite el control independiente de las cuatro ruedas y el diseño mecánico del amortiguador es más simple (no dispone de válvulas o electroválvulas).

El principal inconveniente de incorporar en cualquier vehículo este tipo de amortiguador es el sobrecoste de la tecnología implantada y desarrollada totalmente, los dispositivos electrónicos y el aporte energético, 20 voltios, frente a los amortiguadores convencionales que funcionan pasivamente.



CAPÍTULO 4

INTRODUCCIÓN AL MODELADO CON ECOSIMPRO



4.1. INTRODUCCIÓN AL MODELADO ORIENTADO A OBJETOS

El modelado orientado a objetos es un potente e intuitivo paradigma para la construcción de modelos que proporciona, entre otras cosas, poder ocultar la complejidad de los componentes (encapsulamiento), permitir la reutilización de lo ya diseñado (herencia y agregación) y crear modelos independientes de fácil mantenimiento.

El desarrollo modular permite a un sistema ser modelado de abajo hacia arriba. Los componentes básicos de la librería se combinan para terminar en componentes más complejos mediante dos métodos: extensión por herencia de los componentes existentes y agregación de los ya existentes.

El modelado orientado a objetos (MOO) ha heredado las características propias de los lenguajes de programación orientados a objetos (POO), tales como C++ o Java, en los que se basa [12].

4.2. CARACTERÍSTICAS DEL MODELADO ORIENTADO A OBJETOS

4.2.1. Encapsulamiento

Uno de los objetivos del modelado orientado a objetos es el encapsulamiento de la complejidad. Los lenguajes POO hacen más fácil la vida del maquetista con su gran capacidad de abstracción y la encapsulación de datos y comportamiento.

Sus elementos principales son las librerías y los componentes. Las librerías contienen todos los elementos que intervienen en una determinada disciplina, y se exponen para el uso de otras librerías. El componente es un elemento fundamental para el modelado y expresa un comportamiento dinámico asociado a ciertos datos.

Los componentes están conectados por sus puertos. Al definir el comportamiento de los puertos, el sistema es capaz de insertar de forma automática varias ecuaciones de conexión, por lo que al usuario no le preocupan esas ecuaciones. Para agregar un nuevo componente, sólo hay que preocuparse por su comportamiento interno y no de las ecuaciones de conexión.

4.2.2. Herencia

La herencia es lo que le da a los lenguajes POO su gran poder de intercambio de interface y comportamiento. En todos los campos de la simulación, cuando se han desarrollado muchos componentes se pone de manifiesto que comparten gran parte de código. Este tipo de lenguajes es capaz de reunir datos comunes y ecuaciones en los componentes padre, para ser heredado por los componentes hijo.



Además, esta característica permite la creación de librerías basadas en componentes padre con una complejidad en orden lineal y no en orden geométrico, como otros tipos de programación. Un nuevo componente sobre la base de otro padre, incluirá todos estos datos y comportamientos.

Estos lenguajes pueden ofrecer también herencia múltiple, es decir, un componente puede heredar los datos y el comportamiento de otros que previamente han sido diseñados y probados. Esta capacidad permite, por tanto, la creación de nuevos componentes reutilizando partes de los ya creados.

4.2.3. Agregación

En los lenguajes POO los elementos de modelado son los propios componentes, los cuales pueden heredar y contener copias internas de otros. Este concepto refuerza la capacidad de reutilización porque permite crear componentes compuestos sobre la base de otros que ya se han desarrollado.

Este paradigma se aplica de forma iterativa y no tiene límite. La complejidad de un componente final puede estar oculta por la agregación de probadas y eficaces instancias internas de otros componentes o clases [12].

4.3. TIPOS DE MODELOS

Existen dos maneras bastante diferentes para la construcción de modelos:

- El modelado físico, que consiste en descomponer el sistema en subsistemas cuyas propiedades son conocidas. Para sistemas técnicos se utilizan las leyes naturales que los describen. Las características fundamentales son: posibilidad de incorporación de los mecanismos básicos de funcionamiento, dificultad en la obtención y necesidad de la experiencia en el conocimiento de los sistemas que se estudian.
- La identificación, que trata de usar las observaciones de los sistemas para conseguir fijar las propiedades del modelo a las del sistema. Este método se usa como complemento al anterior. Sus características más importantes son: generar modelos lineales, no hay hipótesis previas, no se aplican mecanismos internos del sistema y se basan solamente en datos experimentales de entrada-salida.

Los diferentes tipos de modelos matemáticos se pueden clasificar en cuatro: modelo de tiempo continuo, modelo de tiempo discreto, modelo cuantitativo y modelo de sucesos o eventos discretos [12].

4.3.1. Modelos de tiempo continuo

Los modelos de tiempo continuo se caracterizan porque en intervalos finitos de tiempo, las variables de estado cambian sus valores infinitas veces. De esta forma, los modelos de este tipo están representados por conjuntos de ecuaciones diferenciales. De entre los modelos de tiempo continuo se pueden distinguir dos categorías distintas:

- Modelos de parámetros concentrados, que están descritos por ecuaciones diferenciales ordinarios (EDO).
- Modelos de parámetros distribuidos, definidos por ecuaciones en derivadas parciales (EDP).

En la figura 4.1 se muestra como cambia un variable a lo largo del tiempo en este tipo de modelo.

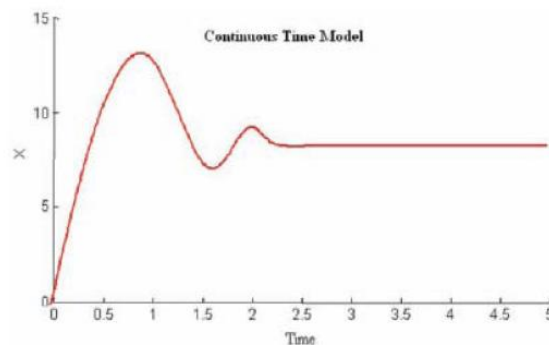


Figura 4.1: Ejemplo de modelo de tiempo continuo

4.3.2. Modelos de tiempo discreto

En estos modelos el eje temporal se discretiza. Se representan comúnmente por ecuaciones en diferencias (EDif), al menos cuando la discretización está espaciada de forma equidistante.

Los modelos de tiempo discreto se utilizan frecuentemente en ingeniería, sobre todo en sistemas controlados por ordenador. Éstos pueden ser también versiones discretizadas de sistemas continuos. Es más, cuando se simula un modelo continuo, realmente se tiene que discretizar el eje de los tiempos para evitar un problema de infinitos cambios.

En la figura 4.2 se muestra la respuesta de un modelo en tiempo discreto.

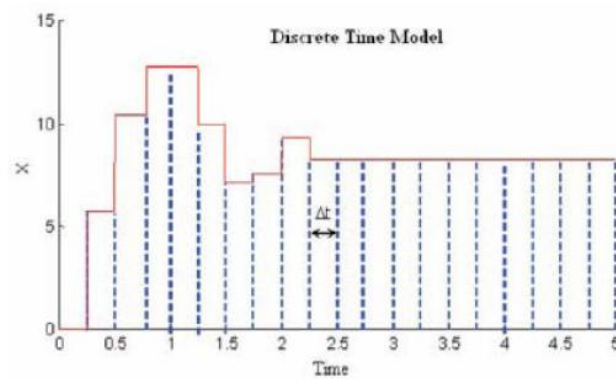


Figura 4.2: Ejemplo de modelo de tiempo discreto

4.3.3. Modelos cualitativos

Los modelos cualitativos son, en realidad, modelos discretos. Aunque con la discretización del eje temporal no necesariamente equidistante. En la figura 4.3 se muestra una trayectoria seguida por el modelo de esta categoría.

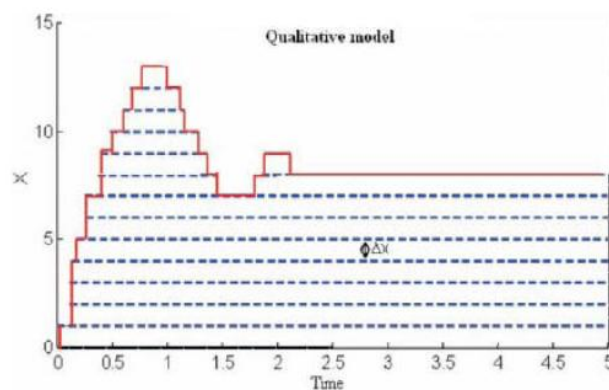


Figura 4.3: Ejemplo de modelo cualitativo

4.3.4. Modelos de sucesos o eventos discretos

En los modelos de sucesos o eventos discretos, tanto el eje temporal como el eje de estados son continuos, pero difieren de los modelos de tiempo continuo en que sólo puede ocurrir un número finito de cambios. En la figura 4.4 se puede observar una trayectoria típica de este tipo de modelos.

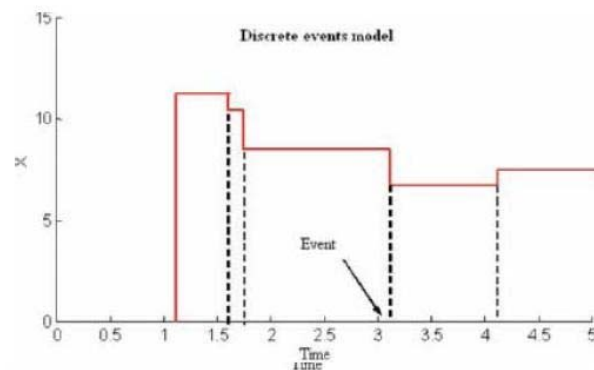


Figura 4.4: Ejemplo de modelo de sucesos o eventos discretos

Dentro de este tipo se incluyen los modelos de colas de cajas en grandes almacenes, determinados procesos de fabricación, la llegada de los coches a un peaje, etc. Este tipo de modelos requiere de grandes dosis de matemática estadística.

4.4. MODELADO CAUSAL O ACAUSAL

La causalidad es la relación entre un evento (la causa) y un segundo evento (el efecto), donde el segundo evento es consecuencia del primero o, dicho de otro modo, el primero es la causa del segundo.

En el modelado existen dos tipos básicos de conexiones:

- Las conexiones causales, o también llamadas conexiones de señal, donde la dirección del flujo queda concretada utilizando la entrada de prefijos en la declaración de al menos uno de los puertos en la conexión.
- Las conexiones acausales, donde el flujo de datos en la conexión no se especifica explícitamente.

Las conexiones causales surgen cuando hay una señal que fluye en una dirección determinada. El sistema causal es aquel que con salida y estados internos sólo depende de los valores de entrada actuales y anteriores.

El modelado acausal es un estilo de modelado declarativo, es decir, modelos basados en ecuaciones en lugar de sentencias de asignación. Las ecuaciones no especifican cuales son las variables de entrada ni de salida. En la figura 4.5 se muestra un ejemplo de sistema acausal [12, 13].

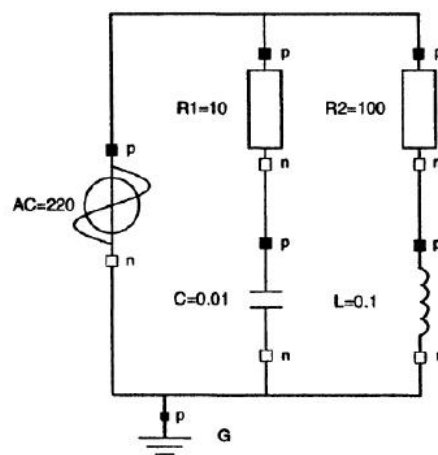


Figura 4.5: Ejemplo de sistema acausal

4.5. ECOSIMPRO COMO HERRAMIENTA MOO

4.5.1. INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA

Para la modelización de los distintos tipos de amortiguadores magneto-reológicos que se presentan se ha utilizado el programa de modelado y simulación EcosimPro. Este potente software es capaz de modelar cualquier tipo de sistema, desde uno mecánico sencillo (tierra-muelle-masa) hasta el más complejo sistema de by-pass de una central de generación de energía de ciclo combinado, pasando por complicados modelos de propulsores aeroespaciales.

EcosimPro se encarga de extraer ecuaciones del modelo final, transformarlas simbólicamente, detectar posibles problemas en la definición del modelo y en las condiciones de contorno y resolver automáticamente lazos algebraicos lineales y no lineales, reduciendo el índice mediante derivación simbólica cuando se encuentren problemas sobredeterminados.

Este programa resuelve con gran robustez ecuaciones lineales, no lineales y algebraico-diferenciales. Esto está oculto al desarrollador, permitiendo que cualquier persona con conocimientos amplios de física, y no tantos de informática, haga uso de la herramienta.

También destaca la capacidad de crear nuevos componentes gráficos usando herramientas CAD. Para cada componente se puede crear un icono y después reusarlo para crear otros por medio del menú de edición de componentes, tan sólo arrastrándolo al esquema que se modela.

EcosimPro es usado para fines industriales con empresas tan importantes como NASA, ESA, Snecma, INTA, DASA, Alenia, etc. Tiene infinidad de aplicaciones en campos como la instrumentación y control, turborreactores, celdas de combustibles, balances térmicos, química, tratamiento de aguas y residuos, mecánica, economía, redes termal, robótica, electrónica y electricidad, así como resolutor puro de ecuaciones algebraico-diferenciales en el campo de las matemáticas.



Las librerías de componente en EcosimPro son totalmente reusables por otros usuarios, pues no incluyen casualidad computacional en las ecuaciones (es decir, el formato con el que se introducen las ecuaciones es intrascendente, ya que el programa despejará automáticamente la variable que le convenga resolver). Los nuevos usuarios pueden reusar librerías existentes o crear las suyas propias.

El modelado dinámico orientado a objetos es relativamente nuevo, ya que su uso no comenzó a generalizarse hasta los años 90. Su utilización está todavía limitada a una pequeña minoría (la mayoría de personas del sector utilizan códigos secuenciales como aproximaciones con bloques, ecuaciones, etc.).

Las ventajas de este tipo de metodología son:

- El modelador encapsula los datos y el comportamiento en los componentes individuales, de tal manera que se minimizan los datos globales.
- Un componente oculta la complejidad de hacer público sólo una parte del componente.
- La interfaz pública comprende los parámetros, datos y puertos, mientras que las variables locales, eventos discretos y ecuaciones están ocultos.
- La complejidad crece de forma lineal en vez de forma geométrica.
- La reutilización de componentes probados.
- La herencia simplifica el modelado mediante el intercambio de datos comunes y ecuaciones. Con menos código se consigue mayor productividad.
- Un componente puede contener ecuaciones que se pueden insertar en el momento de la simulación o no, dependiendo de ciertos parámetros que se pasan al componente.
- El formato de ecuaciones es declarativo. Los algoritmos transforman simbólicamente las ecuaciones de modo que se ajusten de la mejor manera posible para ser resueltas numéricamente.

Los componentes probados se reutilizan constantemente a través de herencia simple y múltiple. Es más fácil hacer cambios en los modelos porque se divide en partes.

Los principales objetivos a la hora de modelar un sistema dinámico son:

- La velocidad para cumplir los requisitos de cada aplicación.
- Corrección para que los resultados puedan ser comparados con la realidad.
- Robustez para que los modelos no tengan problemas numéricos.



- Fácil extensibilidad, para desarrollarlo en el futuro.
- Modificables, para la resolución de errores.
- Legibles, para que los modelos sean fáciles de interpretar.
- Modulables. Componentes y puertos que se agrupan en librerías por campo de aplicación.
- Reutilización de componentes mediante herencia.
- Compatibilidad con otros programas mediante la estandarización de componentes y variables.

Para mejorar la extensibilidad se debe simplificar el diseño para que sea más fácil adaptarse a los cambios. También es importante la descentralización, haciendo que los módulos tengan la mayor autonomía posible y que un simple cambio afecte sólo a un módulo o a un número pequeño de ellos. Sino el cambio podría dar lugar a una reacción en cadena.

Estos factores determinan la calidad en la programación de un sistema dinámico.

Los componentes de EcosimPro se pueden construir desde cero o formarlos a partir de otros básicos predefinidos. Cada uno contiene una descripción matemática de los componentes del mundo real que representa, los cuales se conectan mediante puertos de conexión para crear un nuevo componente.

Los experimentos definen las condiciones iniciales y las condiciones de contorno del modelo matemático así como las soluciones deseadas. Estos experimentos pueden ser triviales o muy complejos utilizando un lenguaje secuencial [16].

El proceso para construir componentes en EcosimPro tiene los siguientes pasos:

- 1) Crear la librería donde se va a ubicar el componente, o seleccionar una ya existente.
- 2) Codificar puertos, componentes, etc.
- 3) Compilar cada elemento de la librería.
- 4) Generar una partición.
- 5) Crear un experimento.
- 6) Simular dicho experimento.
- 7) Obtener los resultados deseados de dicho experimento en el monitor de simulación.

4.5.2. CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA

Las principales características que posee EcosimPro son las siguientes:

- Simulación dinámica multidisciplinar.
- Potente manipulación simbólica y numérica de ecuaciones.
- Modelado orientado a objetos.
- Comprobación de la integridad de simulación en cualquier momento por medio de afirmaciones y de rangos de variables.
- Acceso directo a las funciones externas en lenguajes de programación como FORTRAN, C y C++.
- Optimizado para trabajar con miles de ecuaciones.

En la figura 4.6 se puede observar un ejemplo de un experimento creado con EcosimPro:

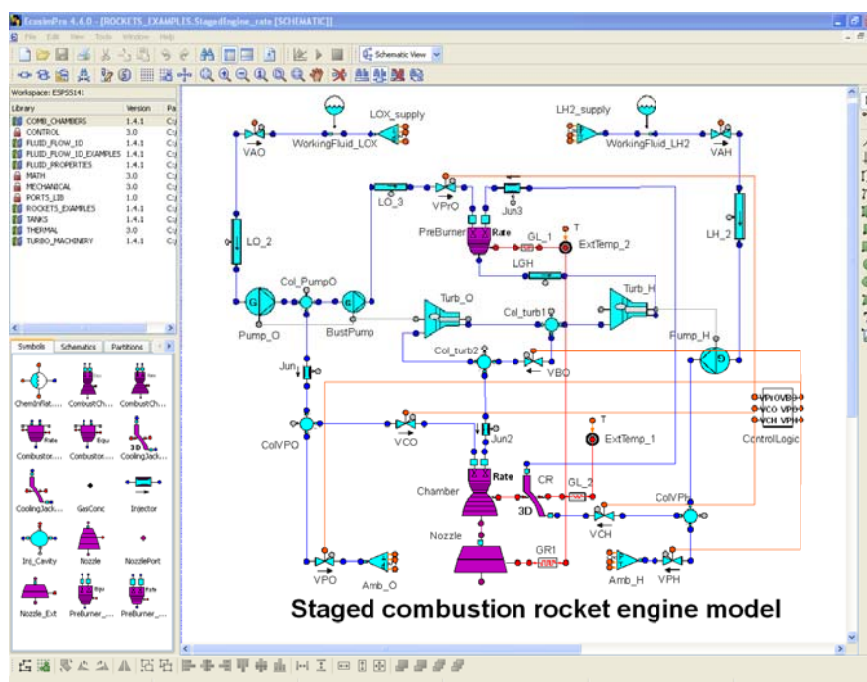


Figura 4.6: Ejemplo de experimento en EcosimPro



4.5.3. LENGUAJE DE MODELADO

EcosimPro tiene un lenguaje de modelado llamado EL (EcosimPro Language). Este lenguaje se utiliza para modelar sistemas dinámicos.

Las principales ventajas de este lenguaje son:

- Modelado no-causal.
- Sintaxis simple para su modelo de componentes.
- Lenguaje de simulación orientado a objetos, con herencia simple y múltiple entre componentes.
- Desarrollo de todo tipo de eventos discretos del sistema.
- Puertos de conexión para simplificar la definición de componentes y la topología.
- Lenguaje experimental para crear múltiples casos de simulación para el mismo modelo en el mismo experimento.
- La programación declarativa para las ecuaciones de entrada. No importa cuál sea el formato de la ecuación de entrada, EcosimPro lo transformará simbólicamente cuando sea necesario.

El programa compilador comprueba la corrección léxica, sintáctica y semántica de cualquier nuevo componente. Si el compilador detecta un error, informa del problema con el número de línea y ofrece una explicación para el error.

Este lenguaje proporciona capacidades para la definición de los componentes, puertos de conexión, funciones, tipos de enumeración, etc. El último modelo de simulación se traduce en código C++ para su uso en otros módulos de software y ejecutar las simulaciones [16].

4.5.4. TIPOS DE DATOS BÁSICOS

Para el modelado, todas las variables deben declararse antes de su uso para que el compilador sepa de qué tipo son. Todos los identificadores tienen un tipo asociado, que determina las operaciones que pueden realizarse en ellos y como deben ser interpretadas dichas operaciones.

En EcosimPro/EL se pueden encontrar las siguientes categorías de datos:

- ❖ REAL/BOOLEAN, usadas en las operaciones lógicas y aritméticas.

- ❖ ENUM, dato de enumeración.
- ❖ ARRAYS/SET_OF, derivados.
- ❖ COMPONENT/PORT/CLASS, elementos con alto nivel de abstracción que contienen el código: variables, ecuaciones, etc.

4.5.5. LIBRERÍAS

Las librerías son un mecanismo utilizado para organizar el diseño de la información

Se pueden encontrar agrupadas por disciplinas: mecánica, control, eléctrica, etc. (figura 4.7).

El programa trae consigo un paquete de librerías estándar y otras que se pueden adquirir por separado.

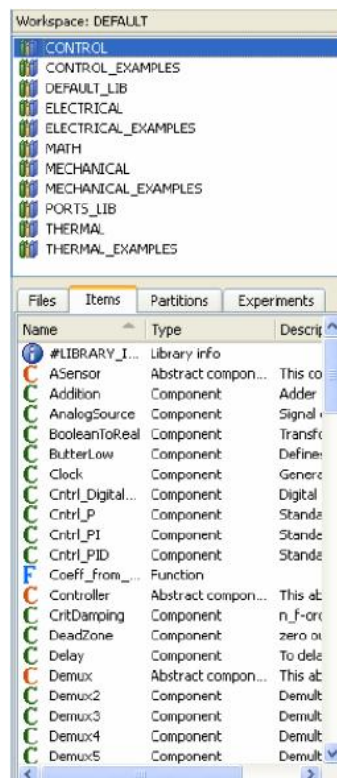


Figura 4.7: Menú de librerías en EcosimPro

Una librería de EL es un conjunto de elementos que pueden ser componentes, tipos de puertos, variables globales, clases y funciones que están relacionados en el mismo área.

EcosimPro permite al usuario manipular estas librerías, creando otras nuevas o desactivando las ya existentes [12, 16].



4.5.6. DECLARACIONES

En EL se pueden utilizar tres tipos de declaración: secuencial, continua o discreta. Los lenguajes más clásicos, como FORTRAN y C++, sólo permiten la declaración secuencial, mientras que otros lenguajes orientados a objetos únicamente permiten las declaraciones discretas.

Normalmente EcosimPro utiliza el modelado continuo, pero también se puede utilizar para simular componentes discretos o la ejecución de códigos secuenciales [16].

a) Declaraciones secuenciales

Las declaraciones secuenciales se utilizan para la inicialización, funciones y cuerpos de eventos discretos que requieren una estricta ejecución de las órdenes. Se ejecutan de manera progresiva y permiten controlar el flujo del programa.

b) Declaraciones continuas

Las declaraciones continuas se utilizan para expresar conjuntos de ecuaciones diferenciales algebraicas, donde el orden en el que se escriben no es importante y serán ordenados más tarde por los algoritmos internos. Estos forman el núcleo donde los modelos físicos continuos se definen.

Las declaraciones continuas son las que definen los modelos matemáticos en la parte continua, pero estos modelos se verán afectados por los sucesos en la parte discreta. Cuando el modelo continuo está integrando, cualquier acontecimiento que se indique es observado.

c) Declaraciones discretas

Las declaraciones discretas se utilizan para expresar acontecimientos. Estos acontecimientos están controlados por las declaraciones condicionales que indican cuándo se produce un evento.

EcosimPro permite que los eventos se definan en la parte continua, éstos detienen los modelos continuos para que puedan ser tratados.

La declaración más importante es WHEN, que declara un suceso a la espera de una condición que se convierta en realidad, y en este punto el código asociado es ejecutado. También se encuentran otros tipos de declaraciones discretas como ASSERT, EXPAND, etc.

4.5.7. PUERTOS

Un puerto de conexión conecta los valores que cada componente necesita para comunicarse con su entorno, debido a las restricciones y ecuaciones que se aplican a las conexiones. Mediante la definición de nuevos puertos se puede modelar cualquier tipo de intercambio de valores entre componentes.



El mecanismo básico para el modelado de un sistema de manera modular es conectar los componentes entre sí utilizando sus puertos. Las conexiones crean un componente compuesto, el cual se puede utilizar para conectarse a sus puertos externos [16].

Cada puerto de un componente debe tener un modo, puede ser IN u OUT. Estos modos tienen tres propósitos:

- Sirven como referencia para el signo de las variables de flujo. Si es positivo el puerto IN implica flujo hacia el interior. Si es positivo el puerto OUT indica flujo hacia el exterior.
- Como criterio de aplicación de ecuaciones en las conexiones.
- Se utilizan para comprobar si hay violaciones de las restricciones de conexión especificadas en el puerto.

a) Ecuaciones de conexión con los puertos

Se necesitan las ecuaciones de conexión de los puertos siempre y cuando un puerto está conectado a más de ellos o cuando un puerto está conectado a otro en el mismo modo, IN-IN o OUT-OUT.

En ambos casos, los puertos no pueden considerarse equivalentes, por lo tanto, es necesario añadir las ecuaciones de conexión que relacionan las variables de los puertos implicados. Las ecuaciones de conexión se generan para cada variable del puerto.

Existen tres tipos de comportamiento básicos:

- EQUAL, donde las variables mantienen el mismo valor para todos los puertos de conexión.
- SUM indica que la suma de los flujos entrantes es igual al flujo de salida.
- Sin indicación, es decir, no se genera ecuación de conexión para la variable.

b) Restricciones de conexión con los puertos

En algunos modelos, existen ecuaciones útiles para especificar algunas restricciones sobre la conexión entre puertos.

Hay dos grupos de restricciones:

- Límites en el número de puertos que pueden ser conectados entre sí.
- Límites en los nodos de los puertos conectados entre sí.

Las restricciones pueden aparecer incluidas por dos razones: que hayan sido añadidas por el propio desarrollador o debido a la falta de información en la definición de variables [12, 16].



4.5.8. COMPONENTES

Los componentes son los elementos más importantes de EcosimPro/EL, son el instrumento básico para la representación de los modelos simples y complejos. Un componente es una manera natural de describir el comportamiento tanto de los modelos continuos como discretos.

Los componentes representan los objetos físicos que actúan independientemente, pero que están conectados a otros. Pueden ser tan simples como una ecuación continua o el manejo de un evento discreto [16].

Los componentes en EL pueden ser abstractos o concretos. Los concretos definen algo tangible. Son los que se usan en los modelos.

a) Componentes abstractos

Los componentes abstractos describen una conducta que por sí sola no representa a ningún elemento físico, y sólo puede ser utilizado como un componente base para otros componentes.

b) Categoría de las variables

Se pueden clasificar las variables fundamentales de los componentes en tres categorías:

- Bloque PARAMETER, donde se encuentran los parámetros de construcción que se utilizan sólo en una instancia del componente.
- Bloque DATA, que contiene las variables de los componentes que se conocen.
- Bloque DECLS, dónde se sitúan las variables locales del componente.

c) Bloque discreto

La información discreta consiste en eventos que deben ser detectados durante la simulación. Cuando se detecta, el sistema ejecuta una secuencia de acciones asociadas que pueden a su vez activar nuevos eventos en una reacción en cadena. Cuando no hay más eventos el sistema sigue con la parte continua, si existe, o se detiene.

En este bloque, sólo se pueden utilizar las declaraciones discretas. Los eventos discretos se evalúan en cada instante de tiempo de los avances de la parte continua.

d) Bloque continuo

Como su propio nombre indica contiene la parte continua del componente, aquí es donde se definen las ecuaciones diferenciales algebraicas. El problema matemático se manda al resolutor numérico de EcosimPro.

Las variables se calculan en las ecuaciones que se definen como continuas, porque su valor sigue el dado por la ecuación matemática, en lugar de cambiar de forma esporádica.

4.5.9. FUNCIONES

Una función se define como una pieza del código que permite llevar a cabo operaciones y, opcionalmente, devuelve un valor. Se utilizan cuando surgen problemas como evaluar una forma numérica y devolver un valor, reutilizar las funciones probadas o encapsular el código de uso frecuente.

Las funciones en EcosimPro son similares a las de otros lenguajes de programación como Fortran o C. Éstas deben ser definidas antes de ser utilizadas (USE MATH en el encabezado del código), y las funciones externas escritas en otros lenguaje han de ser pre-declaradas. Una función se compone de una declaración de interfaz, la definición de variables locales y del cuerpo de la función [16].

a) Funciones con forma de onda

EcosimPro proporciona un conjunto de funciones que normalmente se utilizan para generar las entradas a las variables de la simulación. Estas son muy útiles pero difíciles de programar, ya que son discontinuas. En ocasiones, la discontinuidad no es muy importante o no tiene mucha influencia en el sistema de ecuaciones, y puede ser ignorada. En dichas funciones, las discontinuidades son detectadas automáticamente por el programa y se manejan correctamente para seguir con la simulación.

Las funciones predefinidas por EcosimPro son las siguientes:

- Square, que genera una forma de onda cuadrada, como la de la figura 4.8.

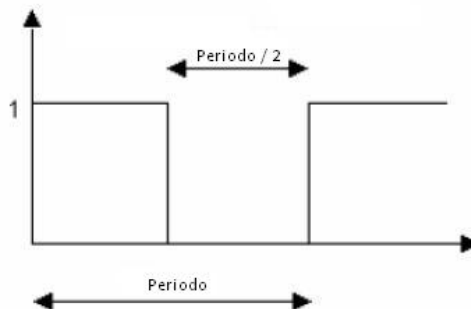


Figura 4.8: Representación de una onda cuadrada

- Step, que proporciona una forma de onda de paso (figura 4.9).

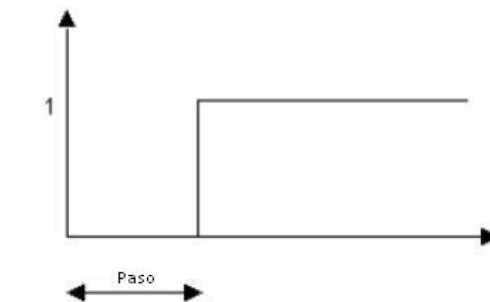


Figura 4.9: Representación de una onda de paso

- Pulse, que genera una forma de onda de pulso (figura 4.10).

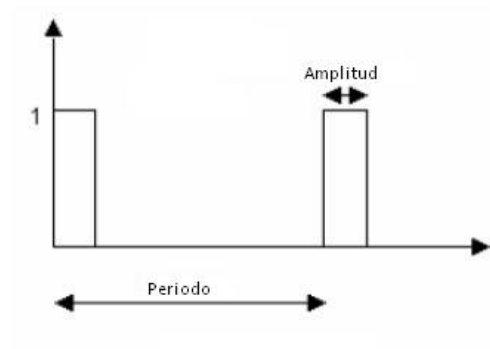


Figura 4.10: Representación de una onda de pulso

- Ramp, que proporciona una forma de onda rampa, como en la figura 4.11.

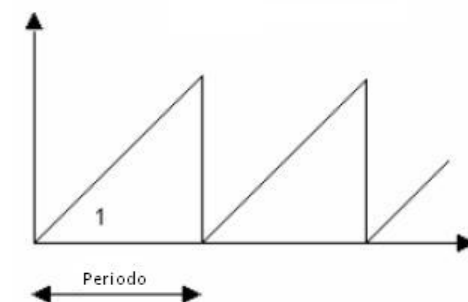


Figura 4.11: Representación de una onda rampa



4.5.10. PARTICIONES

Las particiones en EcosimPro son un paso intermedio entre el componente y el experimento. Una partición es un modelo matemático del componente, antes de simularlo y crear el experimento. El programa siempre ofrece por defecto una partición para cada componente.

El programa también ofrece la opción de editar una partición y observar cada una de las condiciones que se han impuesto. Dos particiones serán iguales si todas las condiciones que tienen son idénticas. EcosimPro puede hacer particiones diferentes en función de los siguientes factores:

- Eliminar los derivados del modelo cuando se quieren eliminar todos los aspectos dinámicos del modelo matemático.
- Tener en cuenta las propiedades de las variables, el modelador puede proporcionar propiedades a las variables.
- Cambiar DATA por una variable desconocida. Se suele utilizar para llevar a cabo estudio de diseño y dar mayor flexibilidad al programa.
- Seleccionar las condiciones de contorno, cuando el sistema contiene más variables que ecuaciones.
- Resolver problemas de alto grado, seleccionando las variables cuyo cálculo no se desea realizar.

4.5.11. EXPERIMENTOS

Una vez que el modelo ha sido desarrollado, se puede llevar a cabo experimentos con él. El lenguaje de programación de EcosimPro es muy parecido al lenguaje utilizado para funciones y componentes. Su propósito es permitir la inicialización los datos para el cálculo de los estados estacionarios, o para integrar el modelo en un plazo de tiempo a través del uso de instrucciones secuenciales.

El código de los experimentos se articula en bloques. El primero, DECLS, se utiliza para la declaración de variables locales para el experimento; el segundo, OBJECTS, para los objetos externos definidos con clases; INIT, los valores iniciales asignados a las variables dinámicas; BOUNDS, expresiones matemáticas asignadas a las variables de contorno (límites del modelo); y por último, BODY, instrucciones secuenciales que definen el experimento.

a) Funciones en los experimentos

Las funciones en los experimentos se pueden reutilizar y definirse en las librerías o en el propio experimento. Se pueden encontrar dos tipos de funciones. Las primeras no son visibles en la librería. Las segundas sí son accesibles directamente mediante las variables de partición. Además, se pueden integrar en el modelo [16].



4.5.12. COMPARACIÓN ENTRE MODELICA Y ECOSIMPRO

Tanto Modelica como EcosimPro son lenguajes orientados a objetos y acausales, basados en ecuaciones para el modelado de sistemas físicos continuos y de eventos discretos. El primero fue desarrollado por una organización sin ánimo de lucro en Suecia y surge por la necesidad de definir un lenguaje de modelado y simulación estándar, fruto del acuerdo de un grupo de especialistas en distintas disciplinas. Por otro lado, EL ha sido desarrollado por Empresarios Agrupados Internacional SA para su herramienta de modelado EcosimPro.

Ambos lenguajes son fundamentalmente declarativos, y contienen todos los elementos necesarios para modelar y simular sistemas dinámicos continuos, discretos e híbridos de manera no causal.

a) Tipos y propiedades de los datos

En la tabla 4.1 se describen los tipos de variables fundamentales en ambos lenguajes.

Tabla 4.1: Comparación entre las variables de Modelica y EcosimPro

TIPO	MODELICA	ECOSIMPRO
Booleano	Boolean	BOOLEAN
Entero	Integer	INTEGER
Real	Real	REAL
Cadena	String	STRING
Tabla 1D	No existe	TABLE_1D
Tabla 2D	No existe	TABLE_1D
Tabla 3D	No existe	TABLE_1D
Puntero a funciones	No existe	FUNC PTR

EL contempla los tipos Tabla y Punteros como funciones en la base del lenguaje. Por el contrario, Modelica no los incorpora, pero proporciona mecanismos para implementarlos como tipos compuestos.

- Propiedades de los datos y variabilidad

La variabilidad de los distintos tipos de variables está presente en ambos lenguajes. La única diferencia existente entre ambos lenguajes es a nivel sintáctico. Ambos permiten definir variables con distintas variabilidades. En primer lugar, las constantes, que una vez declaradas e inicializadas nunca cambian su valor. En segundo término, los parámetros, que una vez declarados e inicializados no cambian su valor durante una misma simulación, aunque sí que pueden variar de una simulación a otra distinta. Como tercera variable se encuentran las discretas, que cambian su valor en el transcurso de la simulación solamente en los instantes en los que se producen eventos discretos (en los intervalos de tiempo entre eventos mantienen su valor). Por último, se encuentran las variables continuas, que cambian su valor en cualquier instante de la simulación [13, 14].



b) Clases de componentes

Las clases o componentes son el elemento fundamental en los lenguajes de modelado orientado a objetos. Éstos constituyen la herramienta básica para representar el comportamiento del cualquier sistema, desde el más simple e indivisible hasta el más complejo formado por varios subsistemas.

En ambos lenguajes las clases se definen mediante un conjunto de secciones de código. Cada una tiene un objetivo determinado en cada uno de los lenguajes. En la tabla 4.2 se enumeran las secciones de las clases en ambos lenguajes.

Tabla 4.2: Comparación de las secciones de las clases en Modelica y Ecosimpro

MODELICA	ECOSIMPRO
Declarativa	PORTS
Protected	DATA
Equations	DECLS
Initial equations	TOPOLOGY
Algorithm	INIT
No existe	DISCRETE
No existe	CONTINUOUS

No existe una correspondencia única entre secciones de ambos lenguajes.

Respecto a la inicialización de variables, en Modelica se pueden hacer mediante dos vías: asignación de atributos 'start' y 'fixed' de las variables a inicializar, o definiendo ecuaciones para el instante inicial en la sección 'initial equation'. En los dos casos las sentencias utilizadas son de carácter declarativo por lo que la herramienta realizará manipulaciones algebraicas necesarias para resolver el problema de valor inicial planteado en la simulación. Sin embargo, en EL, las inicializaciones se realizan en el bloque INIT, ejecutándose secuencialmente las instrucciones de inicialización contenidas en este bloque [13, 14].

c) Librerías

Las librerías son conceptualmente similares en ambos lenguajes. Su objetivo es el de almacenar modelos o clases ya desarrolladas para su posterior utilización. La diferencia estriba en los detalles de implementación.

Una diferencia clara entre EL y Modelica es la inclusión de propiedades de representación gráfica de los componentes dentro de ellos mismos y en las librerías en los que se almacenan. Modelica permite a un componente asociar un icono gráfico dentro de la misma definición de éste mediante directivas 'annotation'. De esta forma, un usuario podría programar la información gráfica de su componente además de modelar su comportamiento.

EcosimPro no tiene capturador de esquemas integrado en la herramienta. En su lugar, se puede utilizar una herramienta externa llamada SmartSketch, que proporciona al usuario las posibilidades gráficas que EcosimPro no ofrece [13, 14].



d) Otras diferencias

Entre el lenguaje de programación de la herramienta EcosimPro y Modelica existen más diferencias, de las cuales destacan las siguientes [13, 14]:

- La partición es un concepto solamente implementado en EcosimPro que permite dar una gran flexibilidad al diseño de experimentos y simulaciones. Es una característica implementada en la herramienta y no en el lenguaje. Las posibilidades que ofrecen las particiones son: la elección de condiciones de contorno, la selección de estados en problemas de índice superior y la posibilidad de cambio en la variabilidad de parámetros.
- EcosimPro/EL ofrece explícitamente la posibilidad de definir experimentos sobre los sistemas a simular mediante bloques de código secuencial que permite: declarar variables, inicializar variables algebraicas en los modelos, definir condiciones de contorno, cálculo de estacionarios, selección de métodos de integración, selección de tolerancias, generación de informes, invocación de funciones externas, etc.

e) Conclusiones

En general, ambos lenguajes están perfectamente dotados de construcciones que permiten abordar la metodología de modelado orientado a objetos de sistemas continuos, discretos e híbridos.

Las conclusiones obtenidas de comparar las dos herramientas son [13, 14]:

- EcosimPro/EL aumentaría sus posibilidades de modelado si los arrays pudiesen contener componentes.
- EL multiplicaría opciones del modelado con la introducción de clases paramétricas.
- El interfaz para simular experimentos de modelos con EcosimPro mediante lenguajes de programación (C++) en una capacidad muy flexible no ofrecida por Modelica.
- La utilización de herramientas gráficas complementarias por parte de EcosimPro/EL, como SmartSketch, hace más incómoda la labor de modelado que si estuviera integrado en la herramienta. Por ello, modelar gráficamente en Modelica es más cómodo que hacerlo con EcosimPro.



CAPÍTULO 5

MODELADO Y SIMULACIÓN DE AMORTIGUADORES MAGNETO-REOLÓGICOS



5.1. INTRODUCCIÓN Y CONSIDERACIONES PREVIAS

Lo que este proyecto pretende es crear en el programa de simulación EcosimPro una librería específica con dos modelos de amortiguador magneto-reológico para la simulación de los mismos en condiciones dinámicas. Anterior a este modelado, no existía ninguna librería que se refiriera a este tipo de amortiguación. El único modelo que existe es el amortiguador simple (ecuación 5.1) cuya fuerza F depende proporcionalmente de la velocidad:

$$F = c \cdot x' \quad (5.1)$$

Los modelos que se van a desarrollar en esta librería son los de Bouc-Wen y Alg [18, 19, 20 21, 22].

En el desarrollo de esta librería, se han respetado las utilidades de la herramienta Ecosimpro, como la herencia de puertos y componentes. Esto ha facilitado el ahorro de código y ha dificultado el desarrollo de cada modelo al tener que poner en común componentes válidos para ambos modelos.

5.2. MODELOS DE AMORTIGUADORES MAGNETO-REOLÓGICOS

El modelado de los amortiguadores magneto-reológicos se utiliza para describir el comportamiento dinámico de los mismos. Por ejemplo, la relación existente entre fuerza de amortiguación y velocidad, fuerza de amortiguación y desplazamiento o fuerza de amortiguación y corriente suministrada [17, 18, 22].

Por lo general, en los estudios de modelos se presentan también resultados experimentales, que son usados para validar el modelo propuesto. Por otra parte, cabe destacar que la mayoría de los modelos son diseñados estudiando la respuesta experimental de los amortiguadores sujetos a carga sinusoidal y la hipótesis de que el fluido se desarrolla en un flujo cuasi estable.

Los modelos físicos que se usa comúnmente para predecir el comportamiento experimental de este tipo de amortiguadores son los siguientes:

1. **Modelo plástico no lineal de Bingham.** Se asume que el fluido no se mueve hasta que la fuerza F producida, sea sobrepasada. A partir de ahí, el fluido asume el comportamiento de un fluido lineal viscoso.
2. **Modelo biviscoso no lineal.** Ampliación del modelo de Bingham incorporando la amortiguación inicial lineal. Cuando se produce un desplazamiento, los amortiguadores presentan histéresis y para capturar este comportamiento fue desarrollado el modelo biviscoso no lineal histerético.
3. **Modelo biviscoso histerético no lineal.** El más exacto en cuando a definición de comportamiento de una amortiguador magneto-reológico.

El modelos uno es cuasiestáticos, es decir, no tiene en cuenta el comportamiento de histéresis del amortiguador, mientras que los modelos dos y tres son dinámicos donde sí se tiene en cuenta la histéresis.

En la figura 5.1 se pueden observar dichos modelos. La línea discontinua corresponde a la respuesta predicha en los modelos, mientras que las líneas continuas muestran el comportamiento observado experimentalmente. Los parámetros dependen en todos los casos de la corriente suministrada y son determinados por resultados experimentales.

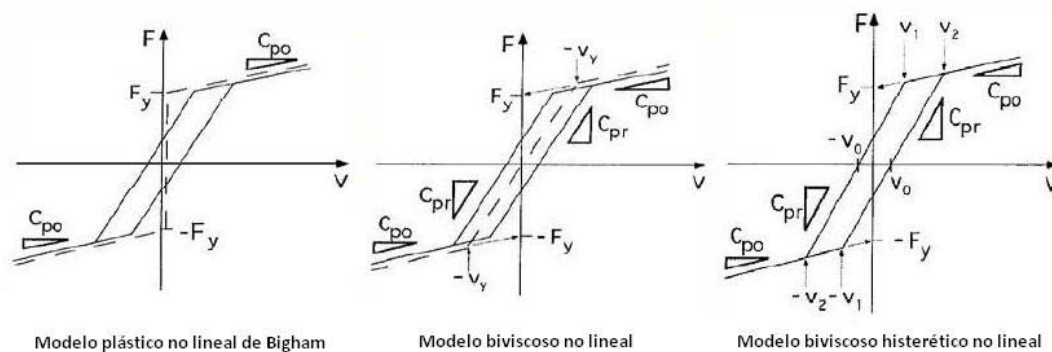


Figura 5.1: Los tres modelos de amortiguador magneto-reológico más importantes

Snyder et al. compararon los tres modelos comunes no lineales y ampliaron sobre otro modelo: el plástico no lineal viscoelástico (NVEP).

Un método diferente para capturar ciclos de histéresis es el de Bouc-Wen. Spencer et Al. [20] presentan un modelo de Bouc-Wen básico, aplicando modificaciones adicionales en éste. Su trabajo también incluye un modelo para considerar la relación entre el voltaje de entrada y las características del fluido magneto-reológico en equilibrio. Yang et al. [29] amplían este último modelo de tal forma que modelan tanto el circuito magnético como el conductor de corriente. Para reducir el tiempo de respuesta del amortiguador, Yang et al. [29] concluyen que las bobinas electromagnéticas deberían disponerse en la línea paralela a la directriz de acción del amortiguador y el voltaje disponible en el conductor de corriente tan alto como sea posible. Además, para reducir la influencia del efecto residual magnético que presentan cuando tiene que reducir la corriente en las bobinas, muestran que la conducción de la corriente en la dirección perpendicular mejora considerablemente el tiempo de respuesta. A su vez, para el amortiguador magneto-reológico estudiaron que el conductor de corriente es capaz de reducir el tiempo requerido para suministrar una corriente dada cuando es comparado con una entrada de voltaje constante.

Otra técnica para modelar el comportamiento de un fluido magneto-reológico está basada en la dinámica del propio fluido con la ecuación de Herschel-Bulkley. Wang et al. [30] consideran efectos de compresibilidad y proporcionan un desarrollo detallado de las ecuaciones que gobiernan el modelo. Además, los parámetros del modelo se encuentran relacionados con el diseño. El estudio concluye validando el modelo con resultados experimentales.

Para entender el tiempo de respuesta de los fluidos magneto-reológicos y electro-reológicos, Choi et al. [31] desarrollan un número de criterios para el control de flujo del fluido magneto-reológico y electro-reológico por placas paralelas. Basándose en simulaciones analíticas y resultados experimentales, concluyen que los fluidos magneto-reológicos son mejor para usos donde sean altas las exigencias de funcionamiento controlables. Sin embargo, se advierte que los fluidos magneto-reológicos no responden tan rápido como los fluidos electro-reológicos para configuraciones equivalentes.

5.2.1. EL MODELO DE BOUC-WEN

Se han desarrollado un gran número de modelos para predecir el comportamiento de los amortiguadores magneto-reológicos, pero el que retrata con mayor exactitud la respuesta es el desarrollado por Spencer et al., cuya solución propone un modelo modificado de Bouc-Wen (BW), que tiene un conjunto de parámetros en función de la corriente suministrada. Otros investigadores ya han estudiado la eficacia del modelo de identificación basado en algunos paradigmas de la inteligencia computacional (lógica difusa y redes neuronales) [20, 21].

Existen varios modelos mecánicos para describir el comportamiento dinámico de un amortiguador magneto-reológico. Los mejores resultados a la hora de retratar el comportamiento de histéresis son obtenidos el modelo de Bouc-Wen representado en la figura [5.2].

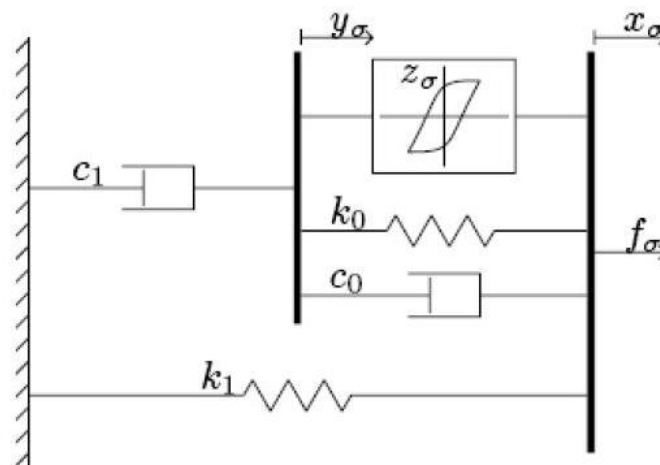


Figura 5.2: Esquema representativo del modelo de Bouc-Wen

La fuerza de amortiguación de este modelo viene definido por la siguiente expresión:

$$F = c_1 \cdot y' + k_1 \cdot (x - x_0) \quad (5.2)$$

Donde x es el desplazamiento total relativo (ecuación 5.5), sus derivadas x' y x'' , velocidad y aceleración (ecuación 5.6 y 5.7) y x_0 la desviación inicial del acumulador de gas en espiral con rigidez k_1 . El desplazamiento parcial relativo y (ecuación 5.3) y la variable evolutiva z (ecuación 5.4) son gobernadas por unas ecuaciones diferenciales acopladas.

$$y' = \frac{1}{c_0 + c_1} \cdot [c_0 \cdot x' + k_0 \cdot (x - y) + k \cdot z] \quad (5.3)$$

Donde k es un coeficiente de rigidez asociado con el desplazamiento de z .

$$z' = -d \cdot |x' - y'| \cdot z \cdot |z|^{n-1} - g \cdot (x' - y') \cdot |z|^n + \alpha \cdot (x' - y') \quad (5.4)$$

$$x = A \cdot (\sin \omega \cdot time + \varphi_0) \quad (5.5)$$

$$x' = A \cdot \omega \cdot (\cos \omega \cdot time + \varphi_0) \quad (5.6)$$

$$x'' = -A \cdot \omega^2 \cdot (\sin \omega \cdot time + \varphi_0) \quad (5.7)$$

Donde n , d , g , α y k_1 son los parámetros de lazo que controlan la forma y la magnitud de los lazos histeréticos. Por medio de una elección apropiada de estos parámetros de lazo en este modelo diferencial, es posible obtener una representación experimental de los lazos histeréticos reales muy exacta. Estos modelos diferenciales tienen muchas ventajas en el análisis de vibración. La más importante es que estos modelos pueden ser fácilmente configurados a través de las ecuaciones de cálculo diferencial del sistema para dar lugar a un sistema totalmente diferente.

Los parámetros c_0 , c_1 , k y k_0 se asumen como funciones de la corriente aplicada al amortiguador magneto-reológico: $i = i(t)$, $c_0 = c_0(i)$, $c_1 = c_1(i)$, $k_0 = k_0(i)$, $k = k(i)$. Si $i_0(i)$ es la corriente suministrada, entonces la dinámica implicada en el fluido magneto-reológico alcanza el equilibrio reológico cuando es modelada por un filtro de primer orden (ecuación 5.8) donde la T es un tiempo constante.

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{T} \cdot (i - i_0) \quad (5.8)$$

Por otro lado, algunos investigadores como Giucle et al. [18] realizan el estudio de los parámetros del modelo Bouc-Wen mediante algoritmos genéticos. Para lo cual realizan el estudio paramétrico como si se tratase de un problema de optimización de caja negra.

Las técnicas de algoritmos genéticos son robustas en la búsqueda probabilística, con resultados muy buenos en la optimización de caja negra. Están basadas en el mecanismo de genética natural y la selección natural, que comienza con una generación de soluciones de problema y se evoluciona hacia mejores soluciones.

El modelo de Bouc-Wen modificado en EcosimPro simulado en el presente proyecto se puede observar en la figura 5.3.

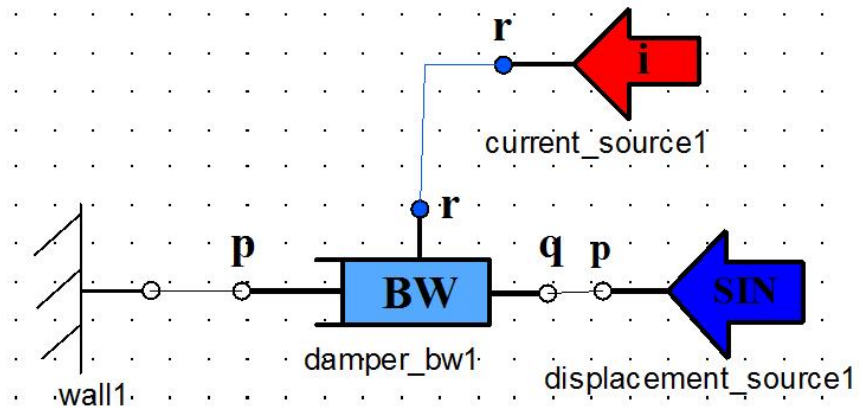


Figura 5.3: Esquema del modelo de Bouc-Wen modificado en EcosimPro

Al final del estudio, Giucle et al. [18] llegaron a los siguientes resultados. En la gráfica izquierda de la figura 5.4 se puede observar la fuerza en función del desplazamiento del amortiguador para distintos valores de tensión. En la gráfica de la derecha se puede apreciar el comportamiento de la fuerza amortiguadora del amortiguador para los mismos valores de tensión.

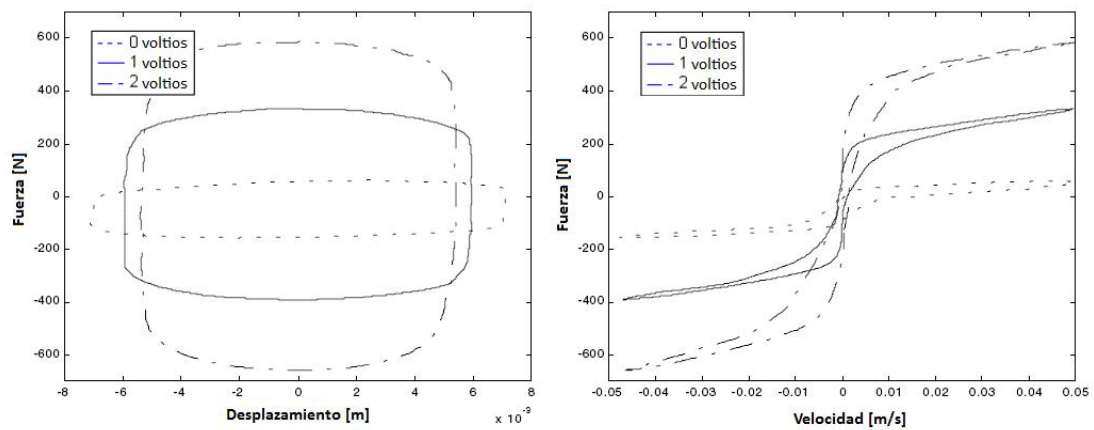


Figura 5.4: Gráficas de resultados del modelo de Bouc-Wen modificado según [20]

5.2.2. EL MODELO DE ALG

Este modelo está centrado en el amortiguador RD-1005 de Lord Ltd. que se muestra en la siguiente figura [22].

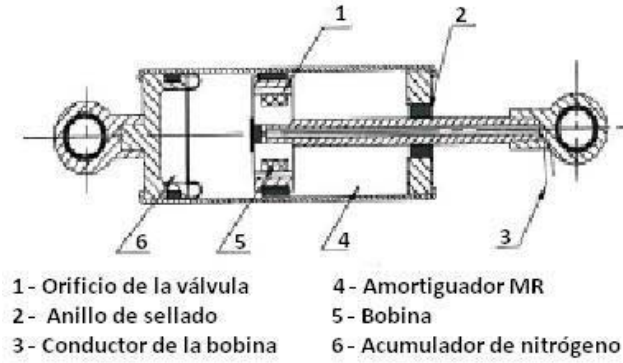


Figura 5.5: Amortiguador magneto-reológico RD 1005 (Lord Ltd.) usado en el estudio

Se ha escogido el modelo de Alg, propuesto por Guo y Hu [22] siguiendo la siguiente expresión para el cálculo de la fuerza amortiguadora.

$$F_d = f_0 + C_b \cdot x'(t) + \frac{2}{\pi} \cdot f_y \cdot \tan^{-1}\{k \cdot [x'(t) - x'_0 \cdot \text{sgn}(x''(t))]\} \quad (5.9)$$

Aquí, F_d representa la fuerza amortiguadora total del sistema, f_0 representa la precarga del acumulador de nitrógeno, compensando la diferencia de volumen entre las dos caras del pistón. El coeficiente de amortiguamiento viscoso viene representado por C_b . La fuerza de fluencia es f_y . El parámetro k es el coeficiente de forma. La velocidad histerética está representada por x'_0 , mientras que x' y x'' describen la velocidad y la aceleración de excitación, respectivamente.

Es necesario el uso de la función sgn , que devuelve el signo de la expresión que está entre paréntesis. Si la expresión es positiva devuelve el valor unidad; si es negativa, -1. En cambio, si la expresión no tiene valor, devuelve cero.

Los valores de C_b (ecuación 5.10), f_y (ecuación 5.11) y x'_0 (ecuación 5.12) dependen del voltaje V que reciben de una fuente externa.

$$C_b = \frac{1,51}{1 + 10,34 \cdot e^{-1,04 \cdot V}} \quad (5.10)$$

$$f_y = \frac{710}{1 + e^{-1,1 \cdot (V-2,3)}} \quad (5.11)$$

$$x'_0 = \frac{40}{1 + 1,81 \cdot e^{-0,2 \cdot V}} \quad (5.12)$$

El valor de k es 0,0725, adimensional al ser un coeficiente. La precarga del acumulador de nitrógeno f_0 vale, para este amortiguador, 247 N.

Por otro lado, este amortiguador está diseñado para trabajar a una frecuencia de 2Hz. Ésto se traduce en una velocidad angular ω de 12,57 rad/s y una amplitud de movimiento A de 15 milímetros como máximo.

Con todos estos valores y ecuaciones se ha procedido a modelar en el presente proyecto mediante los componentes que se describen en el apartado siguiente dicho modelo, el cual, se puede ver en la figura 5.6.

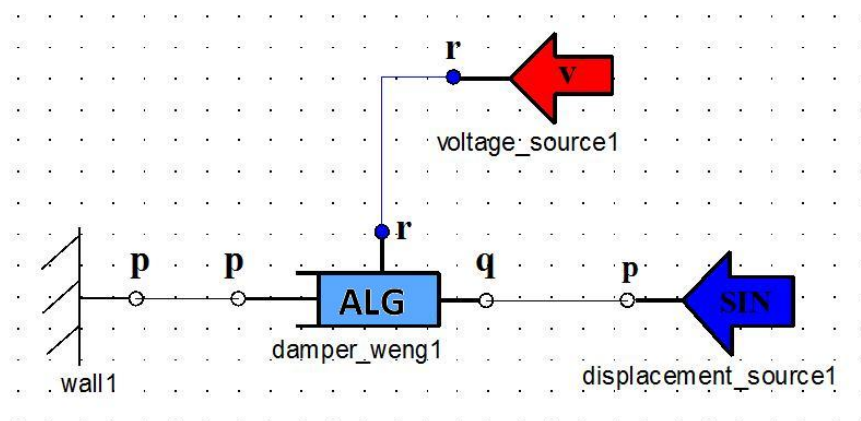


Figura 5.6: Esquema del modelo de Alg en EcosimPro

Como se observa en la figura, el montaje consta de una pared (izquierda), un excitador de desplazamiento sinusoidal (derecha), una fuente de voltaje (arriba) y el amortiguador en sí mismo (centro).

La pared define la posición inicial respecto al eje X de todo el conjunto. El excitador de desplazamiento sinusoidal crea un desplazamiento relativo del amortiguador en forma de onda sinusoidal con una amplitud, velocidad angular y desfase que se puede modificar. El amortiguador, diferente en cada modelo, contiene las ecuaciones que rigen su comportamiento magneto-reológico.

La investigación de Guo y Hu da como resultado la gráfica 5.7 que representa la fuerza amortiguadora respecto la velocidad.

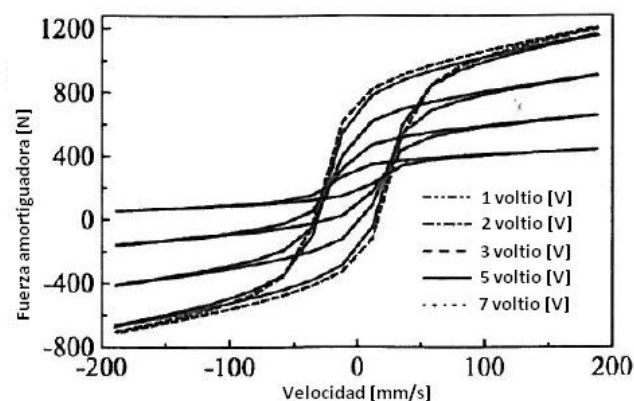


Figura 5.7: Representación de la fuerza amortiguadora respecto la velocidad para varios valores de entrada de voltaje [22]

5.3. LIBRERÍA DE COMPONENTES

El nombre de la librería que se ha creado en EcosimPro es DAMPER_MR. Dentro de esta librería se han generado los distintos componentes que se necesitan para realizar el mismo montaje para ambos modelos. En la figura 5.8 se puede apreciar esta biblioteca con el resto y, además, los distintos componentes que la forman y que se explican a continuación.

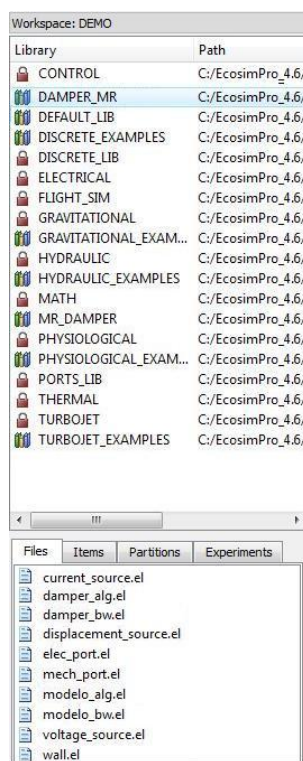


Figura 5.8: Librería DAMPER_MR (arriba) y los componentes de dicha librería (abajo)

5.3.1. COMPONENTE PARED

El componente pared (wall.el) es un elemento que está unido a uno de los extremos del amortiguador. Esta fijación es fundamental ya que para que el muelle tenga movimiento relativo y trabaje es obvio que necesita estar fijo por uno de los extremos mientras que por el otro extremo se le permita moverse libremente en la dirección del amortiguador.

Se ha incluido un parámetro que se puede modificar en este componente: la posición inicial del sistema. Mediante él es posible tomar una referencia inicial respecto a un objeto u otro sistema de cara a los resultados del programa de simulación.

Este montaje se asemeja a la realidad puesto que los amortiguadores van unidos, por un lado a la carrocería y, por otro, a la suspensión que oscila con el movimiento.

El código de este componente se muestra en la figura 5.9.


```

COMPONENT wall
  PORTS
    IN mech_port p
  DATA
    REAL x0=0 UNITS "m" "Wall position"
  DECLS
    REAL x
  CONTINUOUS
    x=p.x
    x=x0
  END COMPONENT

```

Figura 5.9: Código del componente pared (wall.el)

En la figura 5.10 se puede observar la apariencia de este componente en la biblioteca de EcosimPro.

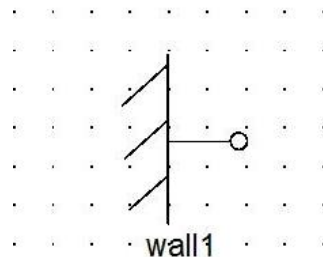


Figura 5.10: Aspecto del componente pared (wall.el)

5.3.2. COMPONENTE EXCITADOR SINUSOIDAL

El componente excitador sinusoidal (displacement_source.el) va unido al otro extremo del amortiguador y hace que este oscile, produciendo un movimiento sinusoidal, tal y como se ha explicado anteriormente. En este componente existen tres parámetros que se pueden modificar: la amplitud, la velocidad angular y el desfase inicial del movimiento. Así, con un solo componente es posible excitar al amortiguador con todo el rango de ondas sinusoidales que existen.

Este componente, al igual que la pared es elemento común en los dos modelos. Ésto es una de las ventajas de EcosimPro en el ahorro de código programando por componentes.

Para la validación del modelo de Bouc-Wen se asigna un valor de amplitud A de 16 milímetros; la velocidad angular ω asignada es 9,42 rad/s, correspondiente a una frecuencia de 1,5 Hz; el desfase angular φ_0 inicial se supone cero.

En el caso del amortiguador de Alg el valor asignado para la amplitud A es 15 milímetros; la velocidad angular ω , 12,57 rad/s, o lo que es lo mismo, una frecuencia de 2 Hz; el desfase angular inicial φ_0 también vale cero, igual que en el modelo de Bouc-Wen.

El código de este componente es el que se expone en la figura 5.11.

```

COMPONENT displacement_source
  PORTS
    IN mech_port p
  DATA
    REAL A=0.016 UNITS "m" "Amplitude"
    REAL w=9.42 UNITS "S^-1" "Angular speed"
    REAL ph0=0
  DECLS
    REAL vel, x
  CONTINUOUS
    x=p.x
    x = A*sin(w*TIME + ph0)
    vel = x'
END COMPONENT

```

Figura 5.11: código del componente excitador sinusoidal (displacement_source.el)

En la figura 5.12 está representado el componente tal y como se encuentra en la paleta de trabajo en EcosimPro.

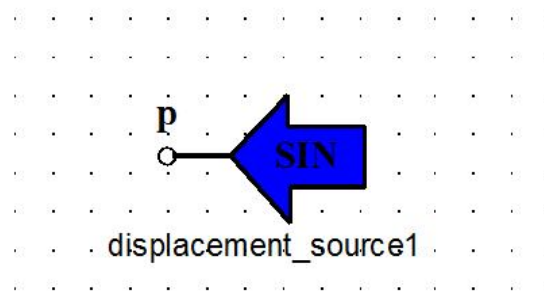


Figura 5.12: Apariencia del componente excitador sinusoidal (displacement_source.el)

5.3.3. COMPONENTE FUENTE DE INTENSIDAD

La fuente de intensidad (current_source.el) es un componente que activa el amortiguador magneto-reológico para que el campo magnético varíe la viscosidad de suspensión de microesferas ferromagnéticas en aceite. Así, el amortiguador tiene más resistencia a deformarse o, dicho de otro modo, varía su rigidez.

Este componente se utiliza en el modelo de Bouc-Wen. El amortiguador de Alg se trabaja mediante una fuente de voltaje.

Su funcionamiento en EcosimPro es tal que tan solo transmite el valor de corriente en amperios al amortiguador magneto-reológico. Este valor se puede modificar dentro del rango de funcionamiento del amortiguador [0,06 - 1,75 A].

El bloque de código para la creación de este componente es el que se enuncia en la figura 5.13.

```

COMPONENT current_source
  PORTS
    IN elec_port r
  DATA
    REAL int = 1 UNITS "A" "Intensity"
  CONTINUOUS
    int=r.i
  END COMPONENT

```

Figura 5.13: Código del componente fuente de intensidad (current_source.el)

El aspecto del componente en la biblioteca de EcosimPro se expone en la figura 5.14.

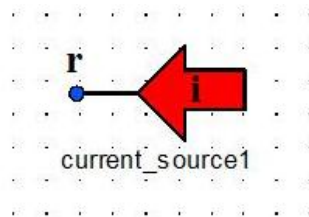


Figura 5.14: Imagen del componente fuente de intensidad (current_source.el)

5.3.4. COMPONENTE FUENTE DE VOLTAJE

El componente fuente de voltaje (voltage_source.el) es el elemento que suministra el valor de voltaje necesario para modificar los parámetros de funcionamiento del amortiguador de Alg. Su funcionamiento es similar a la fuente de intensidad. El rango de voltaje está entre 1 y 7 voltios. Según el autor del modelo [22], con más voltaje los resultados se asemejan menos a la realidad [22].

Este componente tiene el código que se exponen la figura 5.15.

```

COMPONENT voltage_source
  PORTS
    IN elec_port r
  DATA
    REAL vol = 3 UNITS "V" "Voltios"
  CONTINUOUS
    vol=r.v
  END COMPONENT

```

Figura 5.15: Código del componente fuente de voltaje (voltage_source.el)

La figura 5.16 describe el aspecto que posee este componente en la librería de EcosimPro.

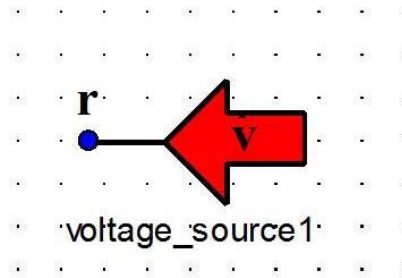


Figura 5.16: Componente fuente de voltaje (voltage_source.el) en EcosimPro

5.3.5. COMPONENTE AMORTIGUADOR DE BOUC-WEN.

El componente amortiguador de Bouc-Wen (damper_bw.el) es un elemento de tres puertos, los cuales se conectan a un componente tierra, un componente excitador sinusoidal y un componente de suministro de corriente. Además, este componente contiene las ecuaciones que rigen el comportamiento del amortiguador y mediante las condiciones de corriente, desplazamiento y variables internas del amortiguador se puede simular el comportamiento, con bastante exactitud, de este amortiguador en la realidad sin necesidad de construirlo, pudiendo llevarlo a estados límite de servicio sin preocupación por la rotura del mismo.

El código correspondiente a este componente es el que se enuncia en las líneas de la figura 5.17.

COMPONENT damper_bw

PORTS

IN mech_port p

IN mech_port q

IN elec_port r

DATA

REAL n = 2 UNITS "[]" "Stiffness constant"

REAL gamma = 2 UNITS "[m**-2]" "Stiffness constant"

REAL betta = 2 UNITS "[m**-2]" "Stiffness constant"

REAL alpha = 96300 UNITS "[]" "Stiffness constant"

REAL A = 207 UNITS "[]" "Stiffness constant"

REAL k1 = 540 UNITS "N/m" "Viscous damping coefficient"

REAL k0 = 1050 UNITS "N/m" "Viscous damping coefficient"

REAL precarga = 0.189 UNITS "m" "Stiffness displacement initial"

DECLS

REAL c0, c1, k, y, z, int, f, dist

CONTINUOUS

p.f+q.f=0

f=p.f

dist=p.x-q.x

int=r.i

c0 = 100 * (5.164 + 26.134*int)

c1 = 100 * (1150 + tanh(1.95 * int))

alpha = 100 * (1297.2 + tanh(1.3 * int))

y' = (1 / (c0 + c1)) * (c0 * dist' + k0 * (dist - y) + alpha * z)

```

z' = -gamma*(abs(dist' - y') * z * ((abs(z))**(n - 1))) - betta * (dist' - y') *
((abs(z))**n) + A * (dist' - y')
f = c1 * y' + k1 * (dist - precarga)
END COMPONENT

```

Figura 5.17: Código del componente amortiguador MR de Bouc-Wen (damper_bw.el)

El aspecto en la librería de EcosimPro de este amortiguador es el que se presenta en la figura 5.18.

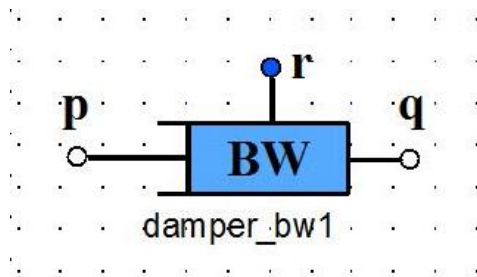


Figura 5.18: Aspecto del componente amortiguador de Bouc-Wen

5.3.6. COMPONENTE AMORTIGUADOR DE ALG

El amortiguador de Alg es un componente de tres puertos (figura 5.20), al igual que el de Bouc-Wen. La diferencia estriba, además de la sintaxis de las ecuaciones basadas en lo enunciado por Guo-Hu, en que el puerto eléctrico del amortiguador admite un voltaje y no una corriente. Esto es porque las ecuaciones por las que se rige la fuerza amortiguadora se basan en un voltaje de entrada que varía de 1 a 7 voltios [V].

El código de este componente se expone en la figura 5.19.

```

USE MATH
COMPONENT damper_alg
  PORTS
    IN mech_port p
    IN mech_port q
    IN elec_port r
  DATA
    REAL fo = 247 UNITS "[N]" "Initial force"
    REAL k = 0.0725 UNITS "[N/m]" "Stiffness variable"
  DECLS
    REAL cb, fy, xo, vol, f, dist, z
  CONTINUOUS
    p.f + q.f = 0
    f = p.f
    dist = p.x - q.x
    vol = r.v
    z = sign(dist)

```

```

cb = 1.51 / (1 + 10.34 * (2.71828 ** (-1.04 * vol)))
fy = 710 / (1 + 2.71828 ** (-1.1 * (vol - 2.3)))
xo = 40 / (1 + 1.81 * (2.71828 ** (-0.2 * vol)))
f = fo + cb * dist' + (2/3.141592) * fy * atan(k * (dist' - (xo * z)))
END COMPONENT

```

Figura 5.19: Código del componente amortiguador MR de Alg (damper_alg.el)

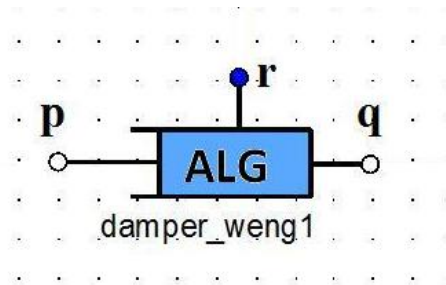


Figura 5.20: Apariencia del componente amortiguador de Alg (damper_alg.el)

5.4. LIBRERÍA DE PUERTOS

Para unir los componentes en un sistema o montaje usamos el elemento puerto. Mediante éste se conectan las variables que procesa un componente y que es necesario que otro también use.

Estos puertos no han sido creados, sino seleccionados de la librería PORTS. Se pueden incluir a la librería MR_DAMPER para su uso directo, o referenciar la librería al principio del componente para poder usarlos.

En el caso que se presenta, se tiene un total de tres puertos: uno de tipo eléctrico y dos de tipo mecánico. A continuación se va a explicar cada uno de ellos.

5.4.1. EL PUERTO ELÉCTRICO

El puerto eléctrico (elec_port.el) es un tipo de conexión (figura 5.22) gobernada por las leyes de Kirchoff (Ley de corrientes y Ley de tensiones). Es decir, en el puerto eléctrico se tiene, por un lado, la primera ley de Kirchoff: *la suma de las intensidades conectadas al puerto suman cero*. Por otro, la segunda ley de Kirchoff que enuncia: *la suma de las tensiones en una malla es igual al valor de la tensión que suministra la fuente que hay conectada en dicha malla*. De esta manera, se consigue asemejar la unión de componentes en el programa de simulación a cómo se comportaría la conexión con un circuito en realidad. Este tipo de puertos es muy usado a la hora de simular modelos electrónicos o eléctricos.

El código de este puerto viene definido en las líneas de la figura 5.21.

```

PORT elec "Electrical pin"
EQUAL REAL v "Potential at pin"
SUM REAL i "Current flowing into the pin"

```

END PORT

Figura 5.21: Código del puerto eléctrico (elec_port.el)

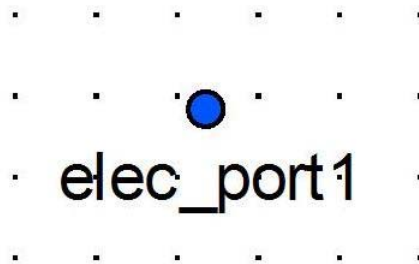


Figura 5.22: Apariencia de un puerto de tipo eléctrico en la paleta de trabajo de EcosimPro

En EcosimPro existe una librería de puertos llamada *PORTS* que se ha usado para llevar a cabo el desarrollo de los amortiguadores. Mediante la llamada *#USE PORTS* en la primera línea de código del componente se asegura que el programa reconocerá el tipo de puertos que se le demande y que existe en dicha librería. En el modelo de Bouc-Wen el puerto eléctrico transmite una intensidad de corriente al amortiguador comprendida entre 0,06 y 1,75 A. Por contra, en el modelo de Alg se conecta al amortiguador una tensión eléctrica cuyo rango se comprende entre uno y seis voltios, tal y como se describen en ambos modelos.

5.4.2. EL PUERTO MECÁNICO

En el caso del puerto mecánico (mech_port.el), se tienen dos conexiones en cada amortiguador. Una es la que une la pared (wall.el) con el amortiguador, fijándolo en uno de los extremos. La variable que se transmite es el desplazamiento del amortiguador. En este caso un valor fijo (x_0). La otra conexión es la que une el amortiguador con el excitador sinusoidal que envía un desplazamiento con onda sinusoidal.

El código de este tipo de puertos viene definido en la figura 5.23.

```
PORT mech_port
  --All components connected hace same position
  EQUAL REAL x UNITS "m" "Position"
  --The sum of all forces are equal to zero
  SUM REAL f UNITS "N" "Force"
  --The intensity transmit between both ports
  EQUAL REAL i UNITS "A" "Intensity"
END PORT
```

Figura 5.23: Código del puerto mecánico (mech_port.el)

En la figura 5.24 se aprecia la imagen del puerto mecánico en estos modelos de amortiguador.

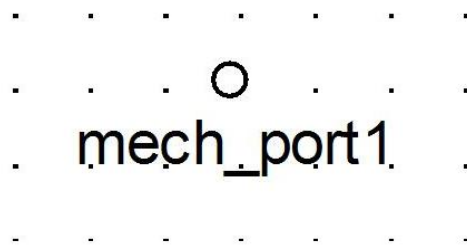


Figura 5.24: Aspecto de un puerto mecánico en la paleta de EcosimPro

A través de estas dos conexiones se obtiene que el desplazamiento relativo (diferencia de ambos desplazamientos) es una función sinusoidal. De esta forma lo que simula el amortiguador es un comportamiento en un firme ondulado donde la altura de la irregularidad es la amplitud de la onda.



CAPÍTULO 6

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

6.1. LA SIMULACIÓN CON ECOSIMPRO

Llegados a este punto, se tiene un esquema formado por los componentes necesarios para modelar el objeto del proyecto. En la pestaña *partitions*, donde se encuentran componentes y esquemas indistintamente, se crea una partición del esquema (figura 6.1). Ya sea una nueva partición, donde se definen las condiciones de contorno, o una partición por defecto, donde la herramienta supondrá unas condiciones de contorno (normalmente iguales a cero). se hace imprescindible este paso porque hay modelos complejos que poseen distintas soluciones dependiendo de cómo se cree dicha partición.

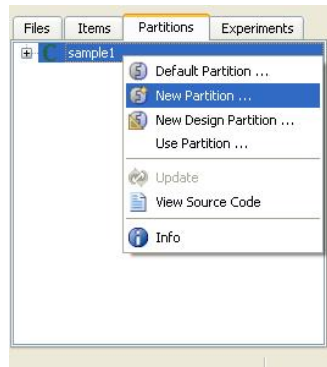


Figura 6.1: Creación de una partición en EcosimPro

Una vez se tiene una partición del modelo correcta, se procede a validar matemáticamente la partición, donde EcosimPro analiza si lo creado tiene sentido matemático para resolverlo (figura 6.2).

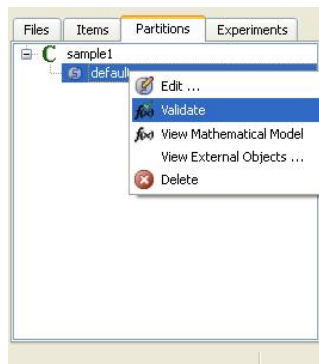


Figura 6.2: Validación de una partición en EcosimPro

Con una partición válida y en la pestaña *experiments* se selecciona la partición y se elige la opción *new experiment...* (figura 6.3). EcosimPro creará un experimento (figura 6.4) con unas condiciones que se elegirán después. En cada partición pueden crearse tantos experimentos como se consideren oportunos. Lo que varía aquí es el tiempo e intervalo de iteración así como la posibilidad de modificar las condiciones de contorno impuestas como partición (*init* y *bounds*). También se elige aquí la posibilidad de un informe en formato *.rpt*.

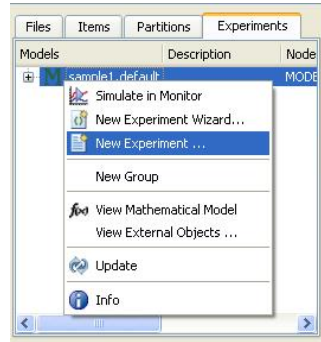


Figura 6.3: Creación de un experimento en EcosimPro

```

EXPERIMENT exp1 ON sample1.default
DECLS
INIT
  -- initial values for state variables
  c1.v = 0

BOUNDS
  -- Set equations for boundaries: boundVar = f(TIME;...)
  r1.p.i = 0

BODY
  -- report results in file reportAll.rpt
  REPORT_TABLE("reportAll.rpt", "***")
  -- integrate the model 15 seconds and obtain results every 0.1 seconds
  TIME = 0
  TSTOP = 15
  CINT = 0.1
  INTEG{}
END EXPERIMENT
    
```

Figura 6.4: Código de un experimento por defecto en EcosimPro

Terminado el código del experimento, se compila y, seguidamente, se simula en monitor (figura 6.5). Esto abre la ventana del simulador de EcosimPro, llamado EcosimPro Monitor. En este interface de intuitivo manejo se pueden representar tantos gráficos, histogramas o tablas como se quiera. Tan sólo hay que elegir la opción en el menú superior y elegir las variables que se quieren relacionar (figura 6.6 y 6.7).

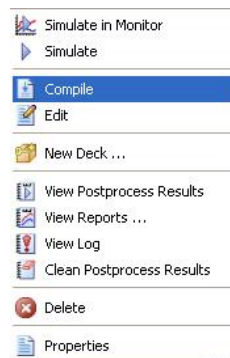


Figura 6.5: Opciones de compilación y simulación en monitor de Ecosimpro

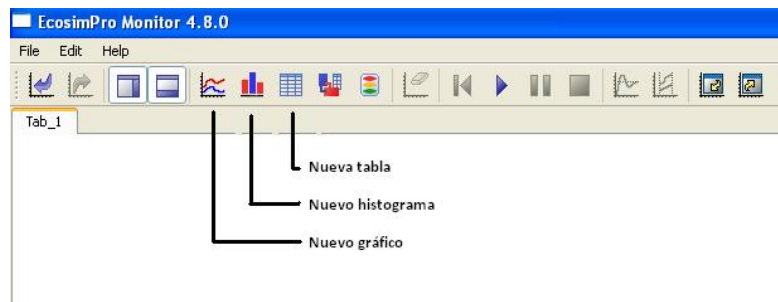


Figura 6.6: Menú de opciones del EcosimPro Monitor

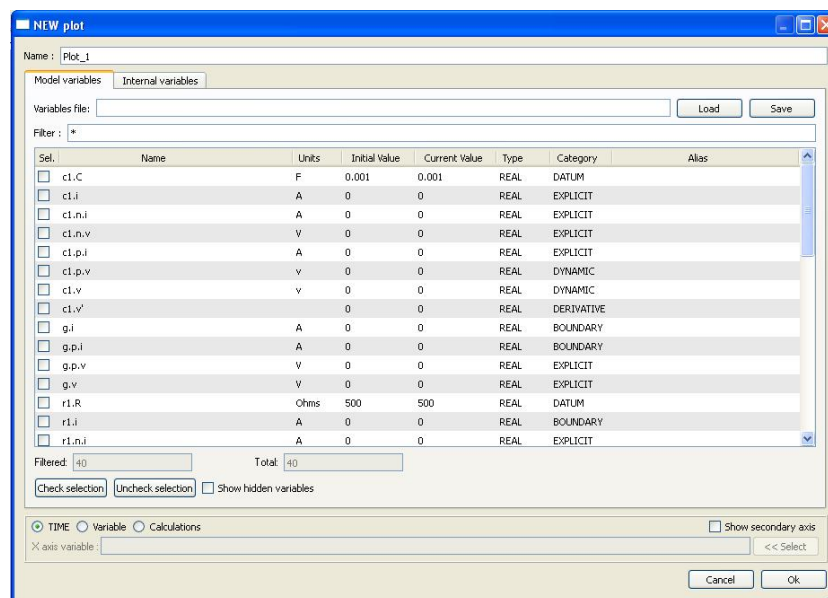


Figura 6.7: Elección de variables en la opción *New plot*

Así, se obtienen los resultados del modelo que se experimenta. La fiabilidad de estos resultados siempre debe de ser contrastada bien con el mismo modelo y parámetros distintos, bien el mismo modelos y parámetros pero distinta herramienta de simulación o también con datos experimentales de la realidad.

6.2. RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE BOUC-WEN

Para simular el comportamiento del modelo de Bouc-Wen se ha utilizado el sistema dinámico incluido en el capítulo anterior y que se detalla en la figura 6.8.

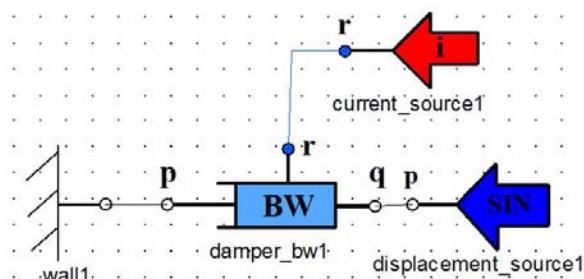
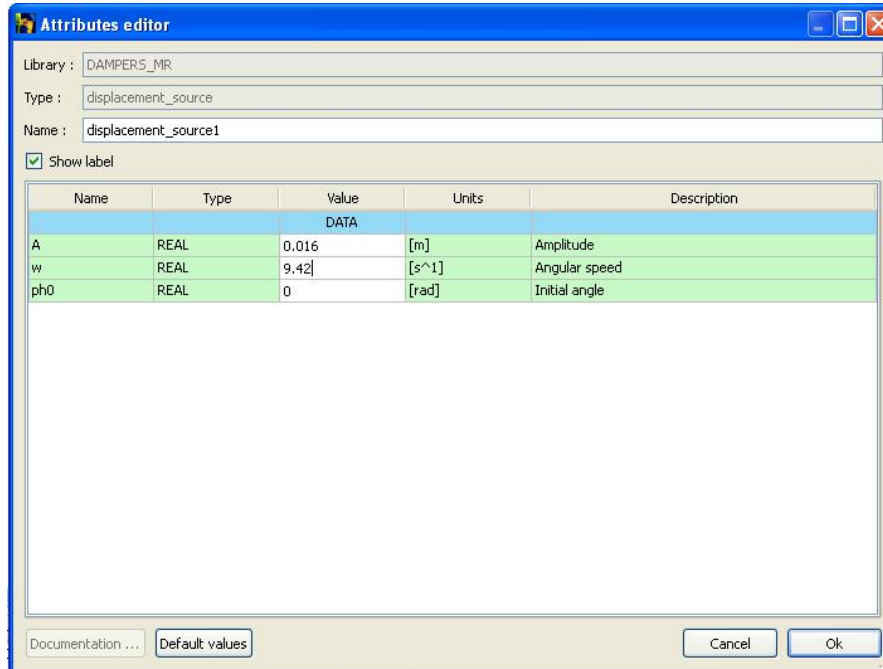


Figura 6.8: Esquema del modelo de Bouc-Wen en EcosimPro

Como se sabe, para llevar a cabo la simulación, es necesario establecer el valor de las entradas de los diferentes elementos del sistema. La figura 6.9 muestra las entradas de la fuente de excitación sinusoidal. Los parámetros que se han introducido son la amplitud A [m], la frecuencia ω [Hz] y el ángulo de desfase inicial φ_0 [rad].



Attributes editor

Library : DAMPERS_MR

Type : displacement_source

Name : displacement_source1

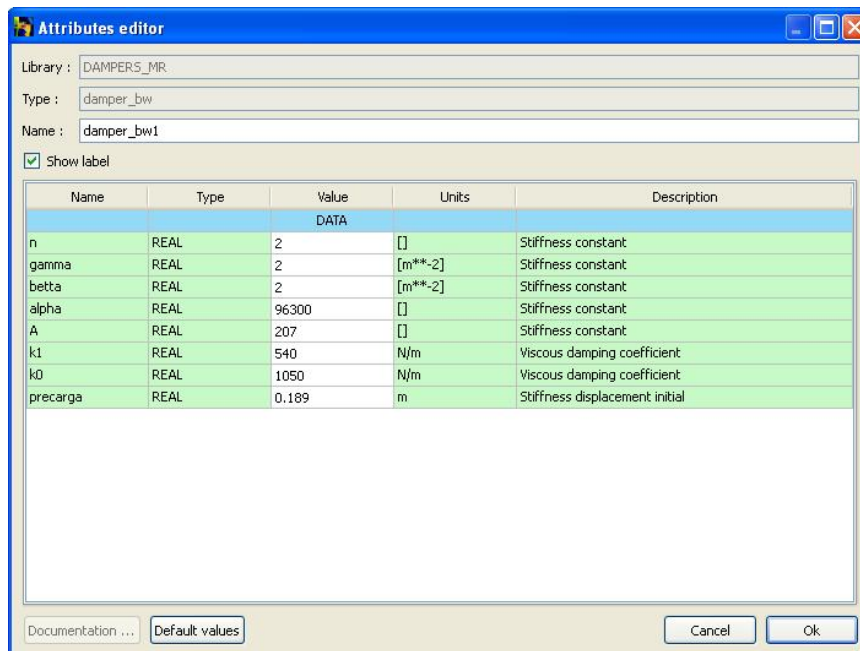
☒ Show label

Name	Type	Value	Units	Description
DATA				
A	REAL	0.016	[m]	Amplitude
w	REAL	9.42	[s^-1]	Angular speed
ph0	REAL	0	[rad]	Initial angle

Documentation ... Default values Cancel Ok

Figura 6.9: Parámetros del componente excitador sinusoidal

La figura 6.10 muestra las entradas pertenecientes al amortiguador de Bouc-Wen. Estos son los parámetros que se permiten modificar desde el esquema del modelo. En la tabla 6.1 se muestran los parámetros y sus correspondientes unidades.



Attributes editor

Library : DAMPERS_MR

Type : damper_bw

Name : damper_bw1

☒ Show label

Name	Type	Value	Units	Description
DATA				
n	REAL	2	[]	Stiffness constant
gamma	REAL	2	[m**(-2)]	Stiffness constant
betta	REAL	2	[m**(-2)]	Stiffness constant
alpha	REAL	96300	[]	Stiffness constant
A	REAL	207	[]	Stiffness constant
k1	REAL	540	N/m	Viscous damping coefficient
k0	REAL	1050	N/m	Viscous damping coefficient
precarga	REAL	0.189	m	Stiffness displacement initial

Documentation ... Default values Cancel Ok

Figura 6.10: Propiedades del componente amortiguador de Bouc-Wen

Tabla 6.1 Parámetros del componente amortiguador de Alg y sus unidades en el SI

Parámetro	Unidades en el SI
α	N/m
c_0	N·s/m
k_0	N/m
c_1	N·s/m
k_1	N/m
γ	m ⁻²
β	m ⁻²
n	-
A	-
x_0	m

Además de las propiedades de los componentes mencionados, se tiene la fuente de corriente, cuyas propiedad modificable es la intensidad I [A] (figura 6.11).

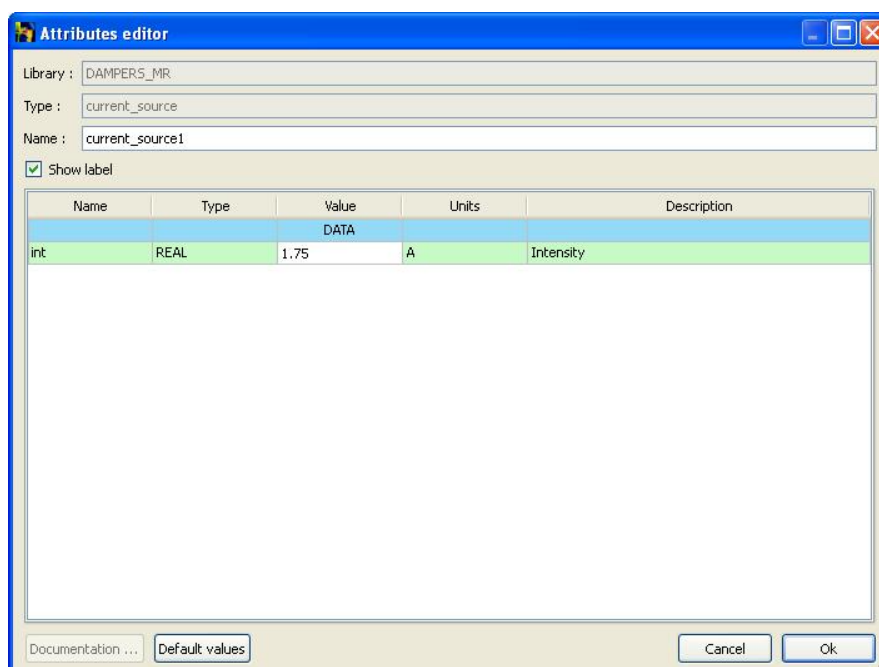


Figura 6.11: Parámetros del componente fuente de corriente

Una vez que el modelo está bien definido, se hace la partición, se valida matemáticamente y se crea un experimento con él, tal y como se ha explicado en el apartado anterior. En este experimento, se define un tiempo de iteración de 6 s. y un intervalo de iteración de 0.01 s. (figura 6.12). El resto de parámetros toman el valor que EcosimPro ha definido a partir de la partición del modelo.

Una vez se ha compilado la simulación para filtrar posibles errores de sintaxis, se procede a la simulación, donde el programa resuelve las ecuaciones planteadas. A través del Ecosimpro Monitor, se pueden extraer las gráficas que se necesiten. En el caso que nos ocupa, las gráficas son las curvas características del amortiguador, esto es, la curva de la fuerza frente al

desplazamiento y la de la fuerza amortiguadora vs la velocidad. Las figura 6.13 y 6.14 muestran las curvas características obtenidas del modelo de Bouc-Wen modificado.

```
USE DAMPERS_MR
COMPONENT modelo_bw

TOPOLOGY
DAMPERS_MR.damper_bw damper_bw1(
  n = 2,
  gamma = 2,
  betta = 2,
  alpha = 96300,
  A = 207,
  k1 = 540,
  k0 = 1050,
  precarga = 0.189)

DAMPERS_MR.displacement_source displacement_source1(
  A = 0.016,
  w = 9.42,
  ph0 = 0)

DAMPERS_MR.wall wall1(
  x0 = 0)

DAMPERS_MR.current_source current_source1(
  int = 1.75)

CONNECT current_source1.r TO damper_bw1.r
CONNECT displacement_source1.q TO damper_bw1.q
CONNECT damper_bw1.p TO wall1.p

END COMPONENT
```

Figura 6.12: Código del experimento del modelo de Bouc-Wen

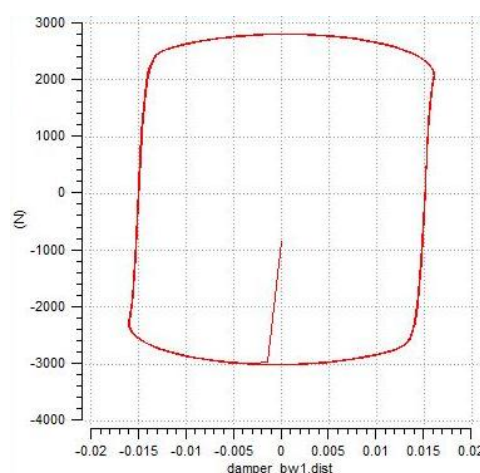


Figura 6.13: Gráfica de la fuerza amortiguadora frente al desplazamiento del modelo de Bouc-Wen (EcosimPro)

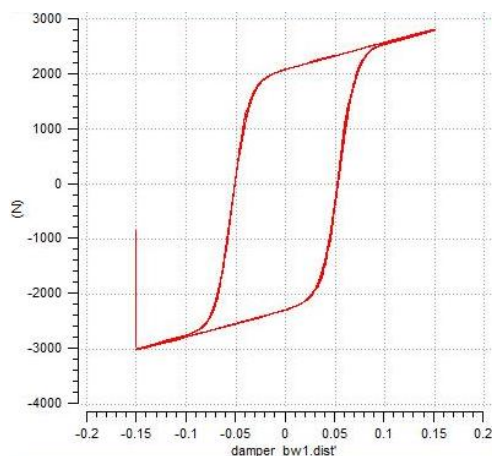


Figura 6.14: Gráfica de la fuerza amortiguadora frente a la velocidad del modelo de Bouc-Wen (EcosimPro)

Para comprobar la validez del modelo, se utiliza el programa Simulink y Modelica, donde ya se ha programado el modelo de Bouc-Wen en ambas herramientas con resultados válidos y comprobados [32] y que, además, se han comparado con resultados experimentales [20].

La programación en Simulink se realiza por un lenguaje de bloques de función (figura 6.15). Se trata del mismo sistema dinámico, simulado con las mismas condiciones de contorno. El método de resolución que se ha utilizado conlleva un tiempo base de una milésima de segundo y resuelve las ecuaciones mediante el método de cálculo ode 5 (Dormand-Prince).

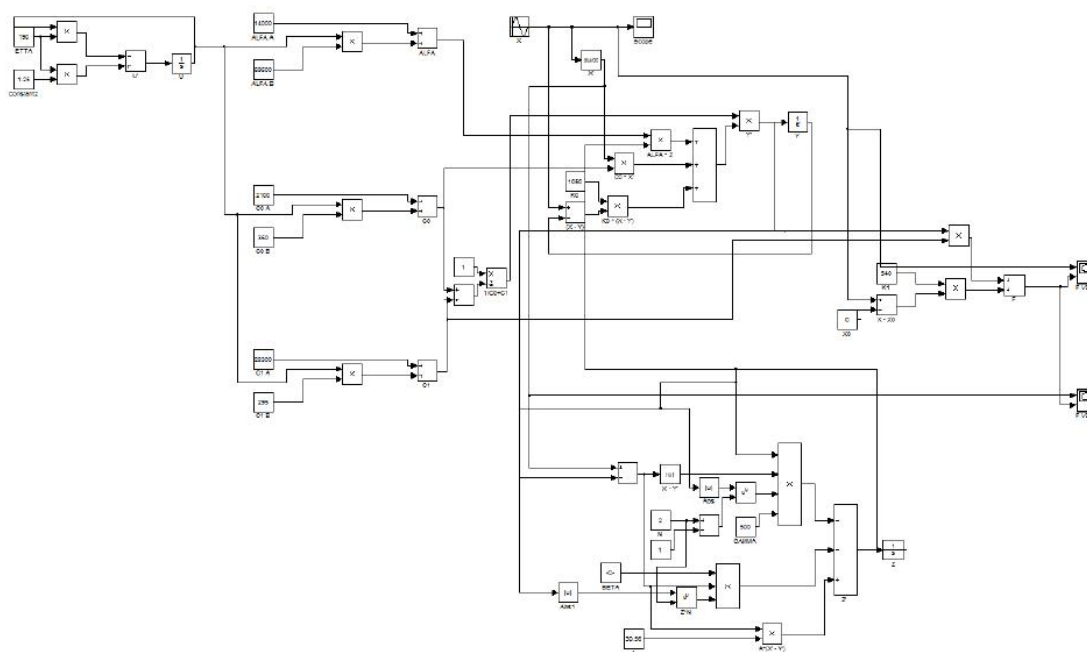


Figura 6.15: Esquema de programación por bloques del modelo de Bouc-Wen (Simulink)

Las figuras 6.16 y 6.17 muestran las curvas de fuerza frente a desplazamiento y fuerza frente a velocidad de la simulación en Simulink.

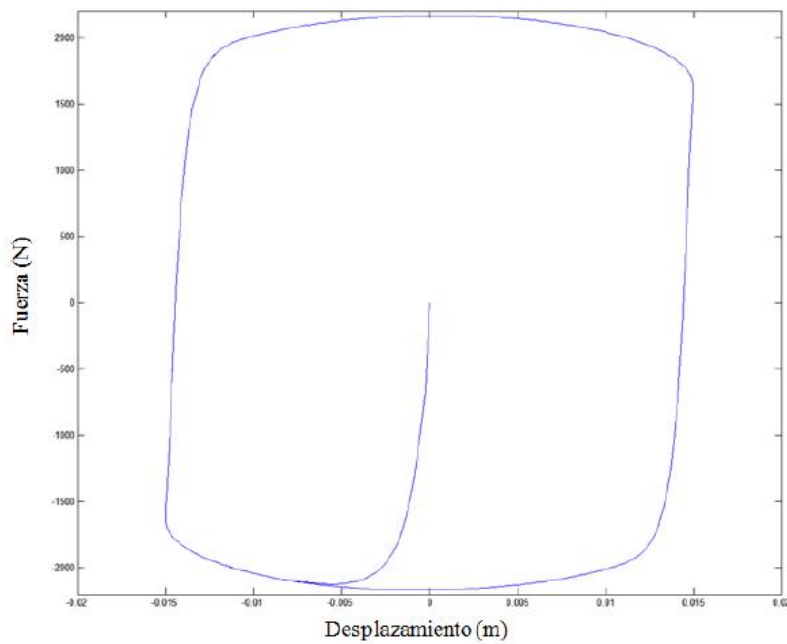


Figura 6.16: Gráfica de la fuerza amortiguadora frente al desplazamiento del modelo de Bouc-Wen (Simulink)

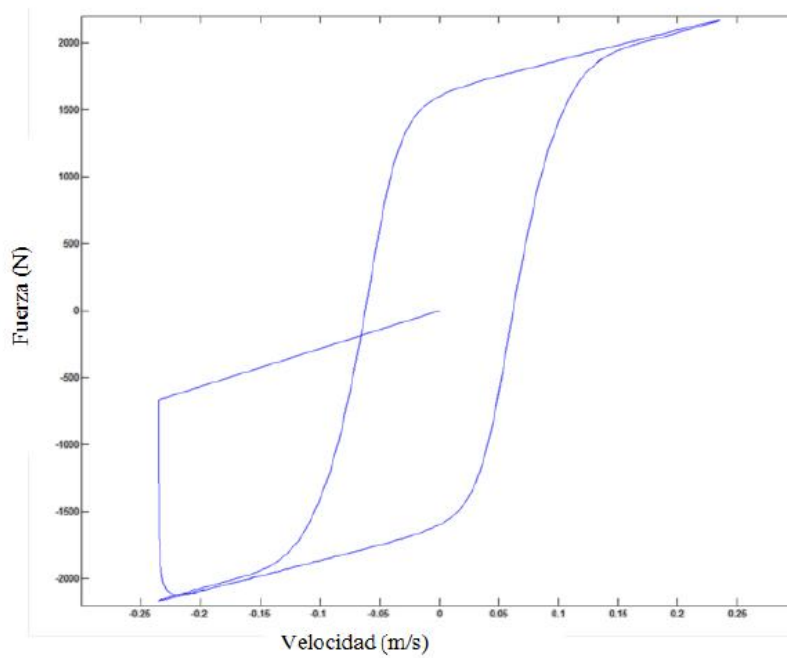


Figura 6.17: Gráfica de la fuerza amortiguadora frente a la velocidad del modelo de Bouc-Wen (Simulink)

Al comparar estas gráficas, lo primero que se observa es su gran similitud con las obtenidas en EcosimPro. En el caso de la representación de la fuerza respecto el desplazamiento no difieren en nada y son prácticamente idénticas. Ambas con una fuerza máxima de 2,8 kN y un desplazamiento máximo de 15 milímetros. Sin embargo, en la representación de la fuerza frente a la velocidad, se ha obtenido para la fuerza máxima un valor de 2,2 kN en Simulink y

2,8 kN en EcosimPro (error relativo de 21%) mientras que los valores de velocidad difieren para la fuerza máxima 1cm/s (error relativo de 40%).

Lo que también se concluye de la comparación es que el modelo en Simulink podría tener alguna incongruencia al no obtener la misma fuerza en el desplazamiento que en la velocidad (2,2 kN frente a 2,8 kN). Sin embargo, en EcosimPro se obtiene el mismo valor (2,8 kN).

6.3. RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE ALG.

El modelo usado para obtener los resultados del amortiguador de Alg se muestra en la figura 6.18.

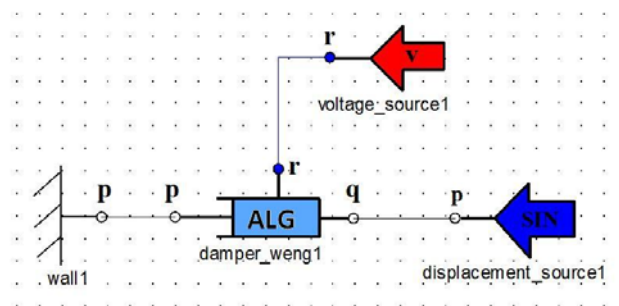


Figura 6.18: Esquema del modelo de Alg en la paleta de EcosimPro

Los parámetros de simulación que se introducen en el componente excitador sinusoidal son los que se muestran en la figura 6.19.

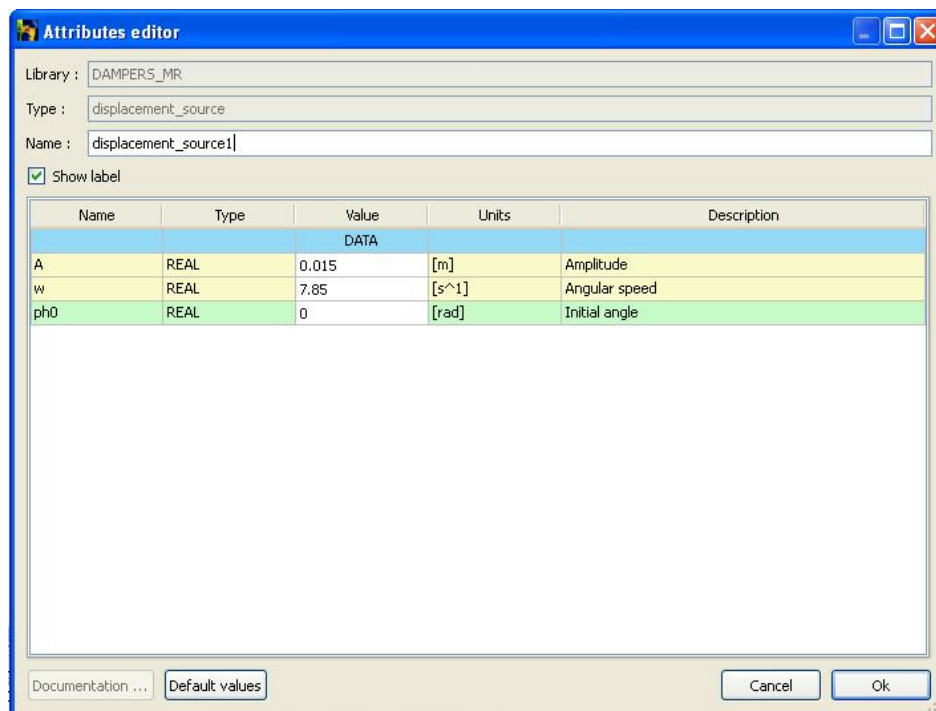


Figura 6.19: Parámetros del excitador sinusoidal

El componente amortiguador de Alg también lleva asociados unos parámetros modificables desde la paleta de trabajo de la herramienta EcosimPro. Estos parámetros se aprecian en la figura 6.20. Además, la tabla 6.2 muestra el parámetro y sus unidades correspondientes en el Sistema Internacional.

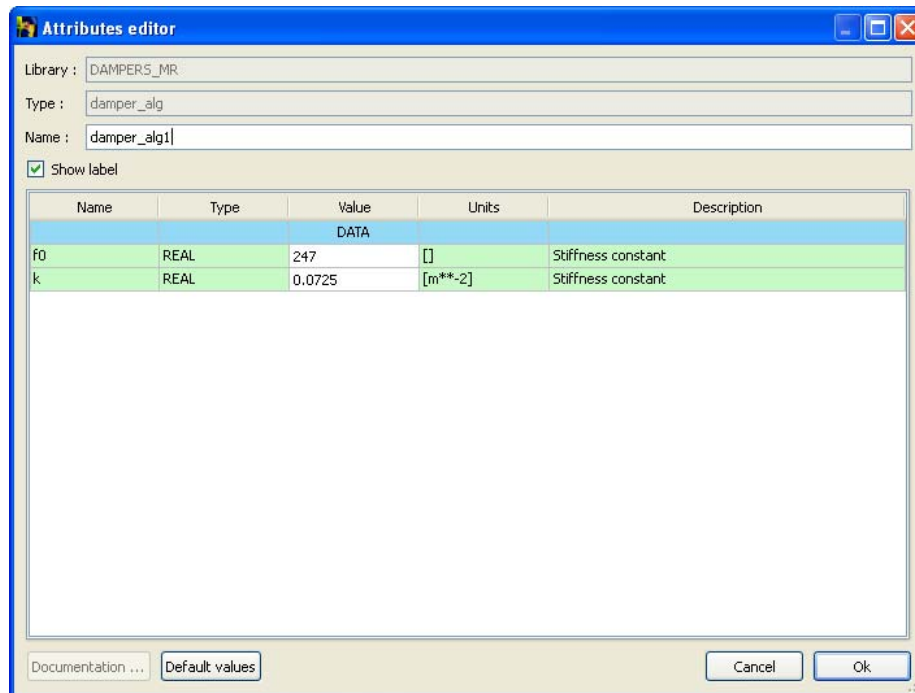


Figura 6.20: Parámetros del componente amortiguador de Alg

Tabla 6.2: Parámetros del componente amortiguador de Alg y sus unidades en el SI

Parámetro	Unidades SI
K	N/m
f_0	N

El único parámetro modificable del componente fuente de voltaje es el voltaje que sale de la misma. La figura 6.21 muestra el menú de propiedades del componente.

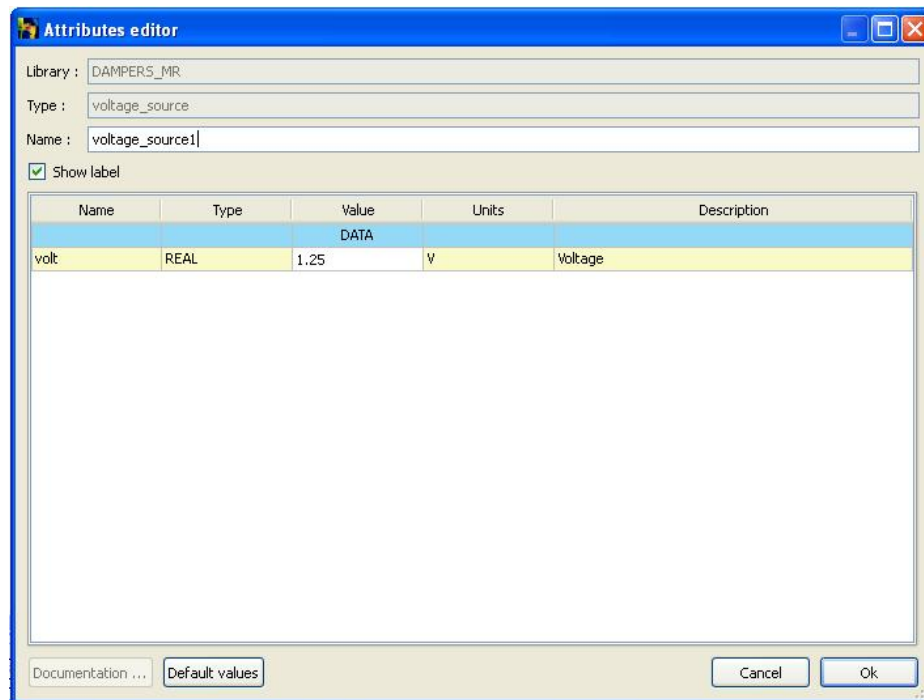


Figura 6.21: Parámetros del componente fuente de voltaje

Como en los casos anteriores, se chequea que el sistema no contiene errores para obtener posteriormente las curvas características del modelo de amortiguador magneto-reológico de Alg. Las figuras 6.22 y 6.23 muestran las curvas de la fuerza amortiguadora respecto al desplazamiento y la velocidad, respectivamente.

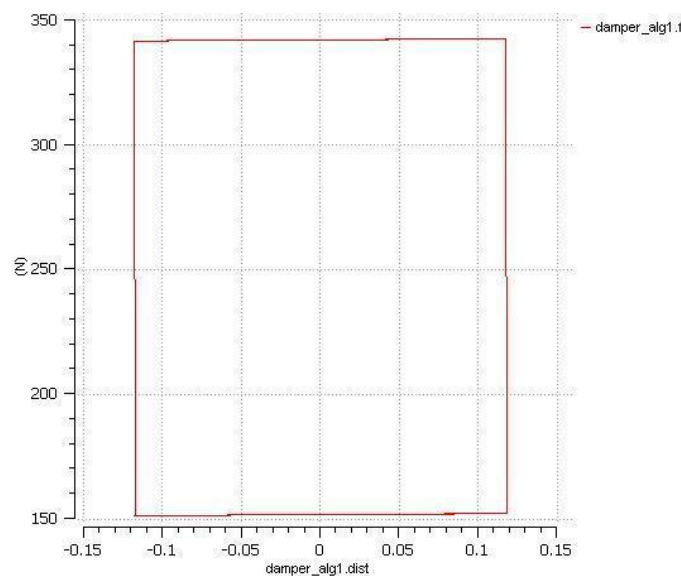


Figura 6.22: Gráfica de la fuerza amortiguadora frente al desplazamiento en el modelo de Alg (EcosimPro)

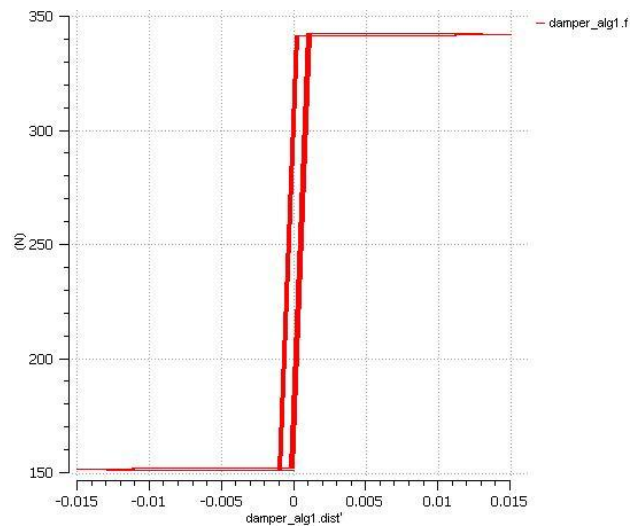


Figura 6.23: Gráfica de la fuerza amortiguadora frente a la velocidad en el modelo de Alg (EcosimPro)

De nuevo, para contrastar dichas gráficas, extraemos las curvas del mismo modelo programado en Simulink (figura 6.24).

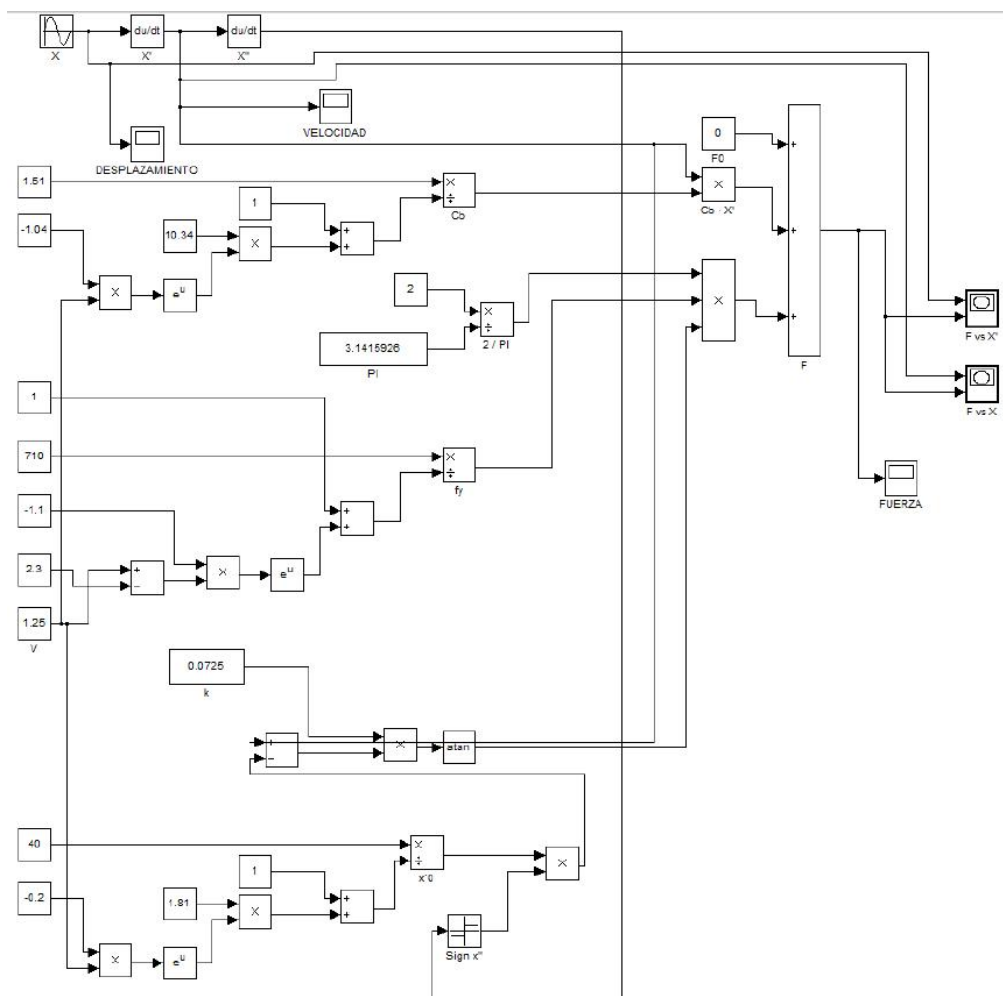


Figura 6.24: Esquema del modelo de Alg en programado en Simulink

De este esquema, se obtienen las siguientes gráficas de simulación de la fuerza amortiguadora frente al desplazamiento (figura 6.25) y frente a la velocidad (figura 6.26), igual que en el modelo anterior.

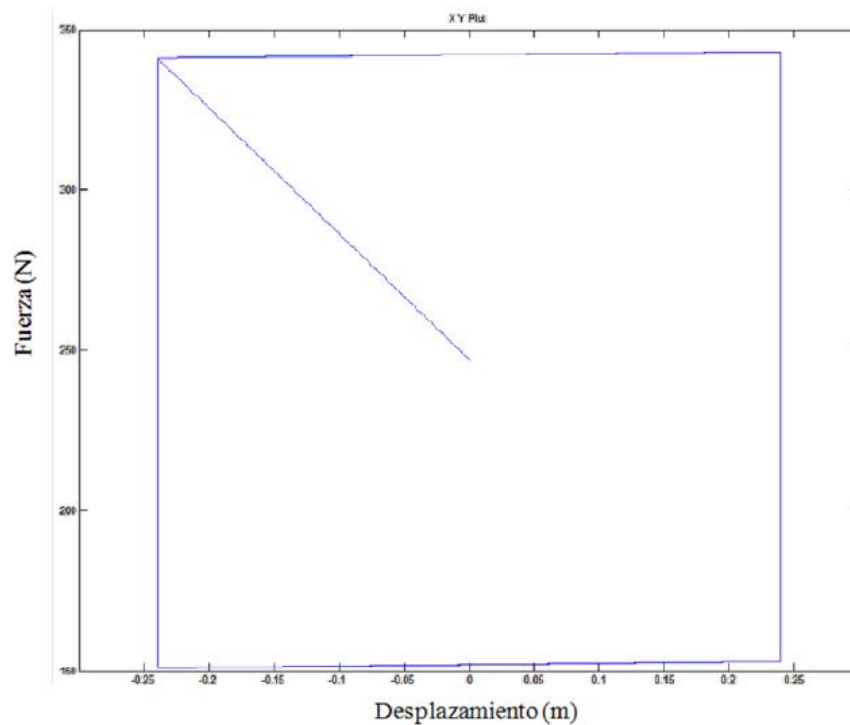


Figura 6.25: Gráfica de la fuerza amortiguadora frente al desplazamiento en el modelo de Alg (Simulink)

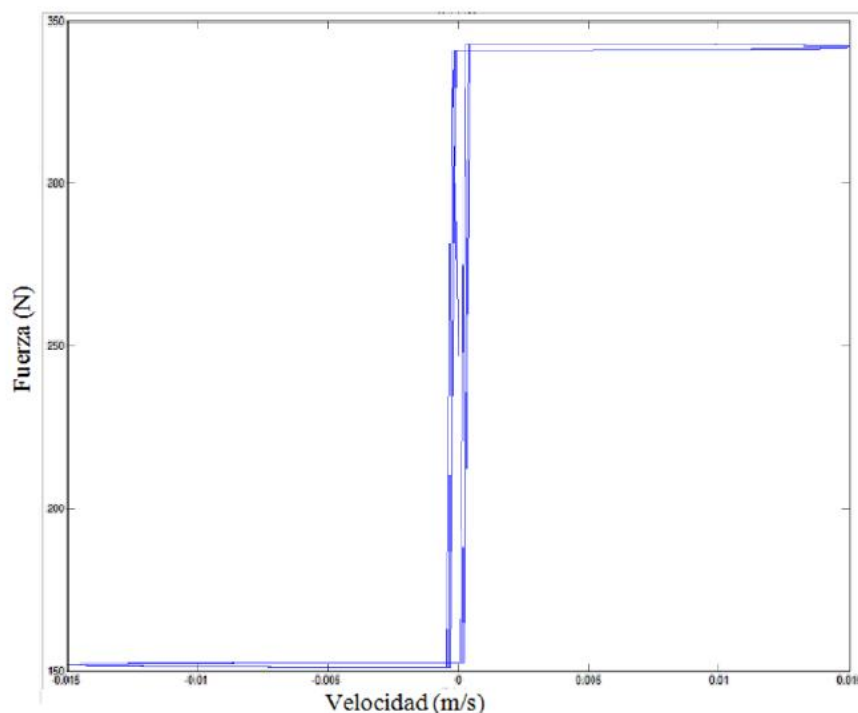


Figura 6.26: Gráfica de la fuerza amortiguadora frente a la velocidad en el modelo de Alg (Simulink)



Se puede observar, en primer lugar, que la forma de las gráficas coincide en ambos casos. Además, los valores de la fuerza máxima en el desplazamiento (340 N) y en la velocidad (340 N) son iguales entre sí y comparados con las gráficas de Simulink. Al comparar el desplazamiento y la velocidad de la fuerza máxima, se concluye que la velocidad es idéntica, mientras que el desplazamiento entre EcosimPro y Modelica en 8 mm (12 mm frente a 20 mm respectivamente), con un error relativo de (40 %).



CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS



7.1. CONCLUSIONES

El objetivo principal del presente proyecto era el de simular el comportamiento histerético de un amortiguador magneto-reológico mediante los modelos de Bouc-Wen modificado y Alg. Se ha utilizado para la simulación la herramienta de modelado y simulación EcosimPro. Después, se han generado y validado los modelos de amortiguador comparando los resultados con los obtenidos con el software Simulink. Una vez terminado el proyecto, se puede concluir que el resultado ha sido muy satisfactorio y que los objetivos se han cumplido.

La ventaja de utilizar la herramienta EcosimPro frente a Simulink es el tratamiento de las ecuaciones. En EcosimPro, la propia herramienta intuye, relacionando ecuaciones y a veces con errores, cuales son las variables a calcular. Por el contrario, Simulink tiene un tratamiento más complejo de las ecuaciones. Esto requiere del desarrollador mayor conocimiento del cálculo que realiza la herramienta.

Cabe destacar un aspecto de la comparación entre los distintos modelos. Los modelos estudiados poseen diferentes algoritmos que reproducen el comportamiento de un mismo amortiguador magneto-reológico; pero no se ha conseguido el mismo resultado con ambos. En el modelo de Alg el resultados son unas curvas bastante aproximadas pero con transiciones demasiado bruscas entre la etapa de compresión y expansión (pendiente de la curva). Sin embargo, el modelo de Bouc-Wen muestra unas curvas más suavizadas.

Tras la validación de todo el modelo y del funcionamiento correcto de cada uno de sus componentes, cabe destacar que en el futuro se puedan utilizar los modelos o parte de ellos para el desarrollo de modelos dinámicos más complejos. Por ejemplo, cualquier medio de transporte que adopte este modelo de suspensión.



7.2. DESARROLLOS FUTUROS

Los futuros avances de este proyecto deberían estar orientados a ampliar la biblioteca de amortiguadores con más modelos que puedan ofrecer al usuario amplitud de recursos para ajustar el máximo posible lo que se quiere modelar. Por ejemplo, los modelos de Dahl modificado, el de fricción de LuGre o el de Kwok son completamente válidos para desarrollar en la herramienta EcosimPro.

Además, la librería desarrollada en el presente proyecto puede ser de gran utilidad para comenzar a simular sistemas dinámicos más complejos. Cualquier vehículo que pueda incorporar estos amortiguadores, como un ferrocarril o un automóvil, es una aplicación práctica de lo que se ha creado en la herramienta de simulación.



BIBLIOGRAFÍA



[1] CORONEL BENAVENTE, Diego. "Montaje y estudio de un amortiguador magneto-reológico en la suspensión de un vehículo automóvil". Dirección: M^a Jesús López Boada. Universidad Carlos III de Madrid. 2010.

[2] LÓPEZ FERNÁNDEZ, David. "Montaje y estudio de un amortiguador magneto-reológico RD 1005.3 en la suspensión de un vehículo automóvil". Dirección: M^a Jesús López Boada. Universidad Carlos III de Madrid. 2010.

[3] CHACÓN HERNANDO, Víctor. "Diseño de una suspensión para un vehículo automóvil basada en amortiguadores magneto-reológicos". Dirección: Beatriz López Boada. Universidad Carlos III de Madrid. 2009.

[4] Manual e ilustraciones sobre la suspensión.
<http://www.km77.com/tecnic/bastidor/clasificacion-suspension/t01.asp>. Octubre, 2011.

[5] J. ALBERDI URBIETA. Manual de amortiguadores y suspensión. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Navarra. 2003.

[6] Apuntes de la asignatura "Teoría de vehículos". Universidad Carlos III de Madrid. Curso 2010-2011.

[7] Información general acerca de la suspensión.
http://www.mecanicavirtual.org/indice_cursos.html#suspension Octubre, 2011.

[8] F. APARICIO IZQUIERDO, C. VERA ÁLVAREZ, V. DIAZ LÓPEZ. "Teoría de los vehículos automóviles". Sección de publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid, 1995.

[9] L. MATELLANES, J. M. CUEVAS, R. CLEMENTE, S. ALLUÉ. "Materiales y estructuras inteligentes".
<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/2971-Materiales-y-estructuras-inteligentes.html> Centro Tecnológico Gaiker. Diciembre, 2011.



- [10] O. LÓPEZ GARCÍA, A. CARNICERO LÓPEZ, R. RUIZ PABLOS. Materiales inteligentes I/II. 1ª parte: Introducción a los materiales del siglo XXI. Anales de mecánica y electricidad. 2004.
- [11] O. LÓPEZ GARCÍA, A. CARNICERO LÓPEZ, R. RUIZ PABLOS. Materiales inteligentes (II): Aplicaciones tecnológicas de mecánica y electricidad. 2004
- [12] F. J. JIMÉNEZ, J. GARRIDO, A. BELMONTE. “Introducción al Modelado y Simulación con EcosimPro”. Pearson. 2010.
- [13] SÁNCHEZ GONZÁLEZ, Alejandro. “Desarrollo de una librería multicuerpo con EcosimPro”. Dirección: Mª Jesús López Boada. Universidad Carlos III de Madrid. 2011.
- [14] L. J. YEBRA, R. PÉREZ, S. DORMIDO, M. BERENGUEL, “Comparación entre Modelica 2.0 y Ecosimpro/EL 3.2”. 2ª Reunión de usuarios de EcosimPro. UNED, Madrid. 2003.
- [15] EcosimPro Modelling and Simulation Software: “Installacion & Getting Started Guide”. Version 4.6.
- [16] EcosimPro/EL Modelling Language. Version 4.4. 2008.
- [17] J. HEINONEN. “Preliminary Study of Modelling Dynamic Properties of Magnetorheological Fluid Damper”. VTT Technical Research Centre of Finland. ESPOO 2006.
- [18] M. GIUCLEA, T. SIRETEANU, D. STANCIOIU, C. W. STAMMERS. “Model parameter identification for vehicle vibration control with magnetorheological dampers using computational intelligence methods”. University of Bath, UK. 2004.
- [19] W. H. LIAO, C. Y. LAI. “Harmonic analysis of a magnetorheological damper for vibration control”. The Chinese University of Hong Kong. China. 2002.
- [20] B. F. SPENCER Jr, S. J. DYE, M. K. SAIN, J. D. CARLSON. “Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers”. Journal of Engineering Mechanics vol. 123. No 3. 1997.



[21] S. ÇESMECI, T. ENGIN. "Modeling and testing of a field-controllable magnetoreological fluid damper". Internation Journal of Mechanical Sciencies 52. 2010.

[22] D. GUO, H. HU. "Nonlinear Stiffness of a Magneto-Rheological Damper". Nanjing University of Aeronautics of Astronautics. 2004.

[23] OVIEDO GUTIÉRREZ, Diego. "Optimización del modelo de Bouc-Wen de un amortiguador magneto-reológico mediante algoritmos genéticos". 2010.

[24] CUPICH RODRÍGUEZ M., ELIZONDO GARZA F. J. "Amortiguadores magnetorreológicos". V Congreso Mexicano de Acústica. 1998.

[25] Instituto tecnológico de Calkini. "Introduccion a la reología". 2010.

[26] Web de Lord Corporation. MR Products & Solutions.
[http://www.lord.com/products-and-solutions/magneto-rheological-\(mr\).xml](http://www.lord.com/products-and-solutions/magneto-rheological-(mr).xml) Noviembre 2010.

[27] Artículo de wikipedia sobre el oscilador armónico. Mayo 2012.
[http://es.wikipedia.org/wiki/Resonancia_\(mec%C3%A1nica\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Resonancia_(mec%C3%A1nica))

[28] Artículo de wikipedia sobre el oscilador armónico. Mayo 2012.
http://es.wikipedia.org/wiki/Oscilador_arm%C3%B3nico

[29] YANG G., CARLSON J. D., SAIN M. K., SPENCER B. J. "Large-scale MR fluid dampers: Modeling and dynamic performance considerations". Engineering Structures vol. 24 Nº 3. 2002.

[30] WANG X., GORDANINEJAD F. "Dynamic modeling of semi-active ER/MR fluid dampers". Damping and isolation. Proceedings of SPIE Conference on smart materials and structures. Vol. 4331. Ed. Daniel J. Inman. 2001.



[31] CHOI Y. T., WERELEY N M. "Assessment of time response characteristics of electrorheological and magnetorheological dampers". Proceedings of SPIE. Vol. 4331. 2001.

[32] JAVIER ARRANZ IGLESIAS. "Simulación del comportamiento de diversos modelos de amortiguadores magneto-reológicos mediante Modelica". Dirección: M^a Jesús López Boada y Beatriz López Boada. 2012.